

Universidad de Alcalá Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Sistema de posicionamiento en interiores mediante
cámara de tiempo de vuelo y marcas pasivas.

ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR

Autor: Raúl Dorado San Segundo

Tutor: Ernesto Martín Gorostiza

2018

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Grado en Ingeniería Tecnologías de telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Sistema de posicionamiento en interiores mediante cámara de
tiempo de vuelo y marcas pasivas

Autor: Raúl Dorado San Segundo

Tutor: Ernesto Martín Gorostiza

Tribunal:

Presidente: Cristina Losada Gutiérrez

Vocal 1º: Juan Carlos García García

Vocal 2º: Ernesto Martín Gorostiza

Fecha:

Agradecimientos

“Si das pescado a un hombre hambriento lo nutres durante una jornada.

Si le enseñas a pescar, le nutrirás toda su vida”

Lao Tsé

Agradezco este proyecto a mi tutor Ernesto por haberlo hecho tan ameno y por el esfuerzo realizado. También quiero dedicárselo a la Piña por estar ahí siempre y tener momentos inolvidables, en particular a Alberto por ser la mejor persona que he conocido sin duda. A mi hermana y mis 2 hermanos, y en especial quiero agradecerles a mi madre y a mi padre por haberme educado de esta manera y haberme enseñado a pescar durante toda mi vida. No podría haber tenido unos padres mejores, os quiero muchísimo.

Índice general

Agradecimientos	5
Índice general	7
Resumen.....	11
Abstract	13
Resumen extendido	15
Índice de figuras	17
1. Introducción	19
1.1. Objetivos	20
1.2. Estructura del documento	20
2. Fundamentos teóricos	23
2.1. GPS. Sistema de Posicionamiento Global	23
2.2. Trilateración	23
2.3. Sistema de localización propuesto	25
2.4. Cámara de tiempo de vuelo	25
2.4.1. Cámaras de modulación continua	28
2.4.2. Cámaras de modulación pulsada	29
2.5. Errores en las cámaras TOF	30
2.5.1. Errores sistemáticos	30
2.5.2. Errores no sistemáticos	30
2.6. Calibración de cámaras TOF	31
3. Desarrollo práctico	33
3.1. Módulo de evaluación OPT8241	33
3.1.1. Características generales. Hardware y software	33
3.1.2. Perfiles de calibración por defecto	36
3.1.3. Fichero PCD, Point Cloud Data	38
3.2. Ensayos en rayo directo	40
3.2.1. Escenario de pruebas en rayo directo	41
3.2.2. Medidas sobre los perfiles por defecto	42
3.3. Calibración sobre el perfil elegido	44
3.3.1. Calibración de la lente	44
3.3.2. Calibración de fase	46
3.3.3. Medidas sobre los perfiles de calibración	46
3.4. Análisis completo del perfil Fase Cal	48
3.4.1. Automatización de la medida de distancia mediante Matlab	48

3.4.2.	Descripción del entorno de pruebas	52
3.4.3.	Medidas angulares	53
3.4.4.	Estudio de la dispersión de las medidas angulares	54
3.4.5.	Estudio de la dispersión de las medidas en rayo directo	58
3.4.6.	Otras pruebas	60
3.5.	Conclusiones	61
4.	Aplicación a trilateración.....	63
4.1.	Caso general de trilateración.....	64
4.2.	Celda de posicionamiento	67
5.	Conclusiones y líneas futuras	71
5.1.	Conclusiones	71
5.2.	Líneas futuras	72
5.2.1.	Detección y diferenciación de marcas.....	72
5.2.2.	Algoritmo de posicionamiento.....	73
5.2.3.	Escalabilidad.....	73
	Bibliografía	75
	Anexo: Código Matlab	79

Resumen

En este proyecto se realiza el estudio de un sensor basado en cámara de tiempo de vuelo, para evaluar su utilidad en sistemas de posicionamiento en interiores, en el cual las marcas serían los puntos de referencia conocidos y la cámara el elemento a posicionar. La distancia a dichas marcas, para obtener la posición en el espacio de localización mediante trilateración, se obtendría a partir de las medidas de profundidad proporcionadas por el sensor.

Un desarrollo completo implicaría varias fases hasta llegar a una aplicación en tiempo real que proporcione la posición de la cámara. Este trabajo se focaliza en la primera fase, es decir, la validación de la cámara de tiempo de vuelo OPT8241 como elemento de medida de distancia, dejando las demás fases planteadas como posible continuación del trabajo. Para ello se estudian la precisión y el rango de distancias que se alcanzan con este sensor.

Palabras clave: Cámara de tiempo de vuelo (TOF), Point cloud Data (PCD), nube de puntos, posicionamiento en interiores, imágenes en 3D.

Abstract

In this project, a time-of-flight camera-based sensor is studied to evaluate its use in indoor positioning systems, in which passive landmarks would be the known reference points and the camera would be the target to be positioned. The distance to these landmarks, in order to obtain the position in the location space by trilateration, would be obtained from the depth measurements delivered by the sensor.

A complete development would involve several stages until arriving at a real time application that provides the position of the camera. This work focuses on the first one, i.e. the validation of the OPT8241 flight time camera as a distance measurement element, leaving the other stages proposed as a possible continuation of the work. For this purpose, the accuracy and the range of distances achieved with this sensor are studied

Keywords: Time-of-flight camera (TOF), Point cloud Data (PCD), indoor positioning, 3D images.

Resumen extendido

En este proyecto se realiza el estudio de un sensor basado en cámara de tiempo de vuelo, para evaluar su utilidad en sistemas de posicionamiento en interiores. En primer lugar, se introduce una analogía entre el GPS y el sistema que pretendemos desarrollar, así como los principios de funcionamiento de una cámara de tiempo de vuelo.

Una cámara de tiempo proporciona una imagen llamada nube de puntos, esta imagen se forma a partir de la información de distancia que la cámara almacena en cada pixel, de tal forma que con la geometría proyectiva cada pixel tiene asociadas unas coordenadas (x, y, z) donde los ejes son, horizontal, vertical y el perpendicular a ambos, respectivamente, y el origen de coordenadas es la cámara. Extrayendo el módulo de estas coordenadas obtenemos a que distancia está de la cámara el objeto que se corresponde con ese pixel. La nube de puntos es el resultado de situar cada pixel en sus coordenadas, formando una imagen en 3D.

Gracias a esta información podemos conocer la distancia a la que está un objeto de la cámara, por lo que utilizaremos a esta como sensor de medidas de distancia para su aplicación en un sistema de localización (propuesto al final del libro).

Este sistema tendrá situado en el techo una serie de marcas (objetos) como puntos de referencia conocidos, de tal forma que la cámara se sitúa en el suelo apuntando al techo, por lo que verá dichas marcas obteniendo la distancia a cada una de ellas. A partir de esas distancias se obtiene una esfera con centro en la marca y de radio la distancia entre la marca y la cámara, de tal forma que la intersección de las esferas dará como solución la posición de la cámara (método de trilateración esférica).

Lo anterior describe el sistema final al que se pretende llegar. Para llegar a tal sistema hay que realizar diferentes fases, en este proyecto se realiza la primera fase, la cual consiste en la validación del OPT8241 como sensor de medida de distancias válido para posicionamiento.

Se realizarán pruebas donde se busca determinar la precisión y el rango de medidas que admite este sensor, de tal forma que dichas pruebas se hacen suponiendo un escenario real de trabajo.

Una vez se valida la cámara como un sensor de medida preciso en el rango de trabajo, se analiza el ángulo de visión de la cámara, ya que si la cámara no ve todas las marcas que necesita para realizar el método de trilateración, no podría obtenerse la posición.

En el capítulo 4 se realiza un estudio sobre las distancias en a las que deben posicionarse las marcas en función de la limitación del ángulo de visión de la cámara, es decir, se define la celda mínima de posicionamiento.

Por último, se describen las líneas futuras a seguir para desarrollar el sistema final de posicionamiento, se diferencian dos fases posteriores a este proyecto.

Una consiste en la realización de un algoritmo de detección y diferenciación de marcas en tiempo real, de tal forma el resultado sea la distancia a la que se encuentra la cámara de cada marca que tiene dentro de su ángulo de visión.

La última fase como continuación de la anterior consistiría en la realización del algoritmo de posicionamiento a partir de las medidas de distancia obtenidas. Este trabajo deberá tener en cuenta diferentes espacios de localización de tal forma que consiga desarrollar una propuesta de como situar las marcas en cualquier espacio.

Índice de figuras

<i>Figura 1: Trilateración, distancia satélite 1 [15]</i>	24
<i>Figura 2: Trilateración, distancia satélite 2 [15]</i>	24
<i>Figura 3: Trilateración, distancia satélite 3 [15]</i>	24
<i>Figura 4: Texas Instruments OPT8241-CDK-EVM 3D ToF Sensor Evaluation Module[16]</i>	26
<i>Figura 5: Cámara Basler[17]</i>	26
<i>Figura 6: Señal IR y tiempo de vuelo [3]</i>	27
<i>Figura 7: Componentes cámara TOF [4]</i>	27
<i>Figura 8: Muestras modulación continua [2]</i>	28
<i>Figura 9: Modulación pulsada</i>	29
<i>Figura 10: Muestras modulación pulsada</i>	29
<i>Figura 11:Imagen detallada del OPT8241 [7]</i>	34
<i>Figura 12: Hardware OPT8241 [8]</i>	35
<i>Figura 13: Pantalla Voxer Viewer [6]</i>	36
<i>Figura 14: Imagen de un PCD</i>	39
<i>Figura 15: Ejes de coordenadas del OPT8241 [6]</i>	40
<i>Figura 16: Escenario de pruebas en rayo directo</i>	41
<i>Figura 17: Ejes de coordenadas de la lente</i>	44
<i>Figura 18: Imagen para la calibración de la lente [6]</i>	44
<i>Figura 19: Comprobación de calibración de la lente [6]</i>	44
<i>Figura 20: Ventana de selección de calibraciones [6]</i>	45
<i>Figura 21: Ventana de calibración de la lente [6]</i>	45
<i>Figura 22: Ventana de calibración de la fase [6]</i>	46
<i>Figura 23: Interfaz gráfica de Matlab</i>	48
<i>Figura 24: Triangulo rectángulo</i>	50
<i>Figura 25: Cara de 10 x 10 cm a 5 metros ocupa 5 x 5 pixeles</i>	51
<i>Figura 26: Entorno final de pruebas con 2 railes formando un ángulo recto a 350 cm</i>	52
<i>Figura 27: Medidas en cruceta aumentando 20cm progresivamente</i>	54
<i>Figura 28: Graficas de medidas angulares en el tiempo, ordenadas respectivamente con la Tabla 10</i>	56
<i>Figura 29: Grafico de resultados en las medidas angulares en función del tiempo</i>	57
<i>Figura 30: Error en las medidas y desviación típica</i>	58
<i>Figura 31: Graficas de Matlab sobre las medidas en rayo directo</i>	59
<i>Figura 32: Grafica de Matlab de medidas en máximo ángulo vertical</i>	60
<i>Figura 33: Proyección del ángulo de la cámara a una altura 'z'</i>	63
<i>Figura 34: Espacio de posicionamiento y trilateración mediante 3 marcas pasivas</i>	64
<i>Figura 35: Imagen de fase de las 3 marcas en diferentes instantes</i>	66
<i>Figura 36: Ángulo de visión de la cámara</i>	67
<i>Figura 37: Celda de posicionamiento</i>	68
<i>Figura 38: Posición extrema de la cámara</i>	68
<i>Figura 39: Ampliación del espacio añadiendo una marca</i>	68
<i>Figura 40:Ampliación de la celda juntando las marcas</i>	69

1. Introducción

Actualmente la tecnología GPS es la tecnología dominante en lo que se refiere al posicionamiento en exteriores, pero en interiores la señal GPS se pierde. Esto es uno de los problemas que actualmente la ingeniería está tratando de resolver. Existen diferentes tecnologías para dar solución a este problema, pero ninguna llega a la solución definitiva con la misma aceptación que tiene GPS. Se ha investigado mucho sobre los diferentes LPS (Local Positioning Systems), dando lugar a que diferentes tecnologías compitan por ser la dominante en este campo.

Estas soluciones tienen en común que todas necesitan obtener una medida de distancia, siendo la precisión de esta medida un factor crítico o no en función de la aplicación, por ello lograr un sistema (y tecnología) con la que se consiga posicionar con alta precisión, en condiciones realistas, presenta un gran reto.

En este trabajo se investigará sobre una cámara de tiempo de vuelo (TOF), ya que es una tecnología relativamente moderna en la que actualmente se está investigando.

El principio de funcionamiento de una cámara de tiempo de vuelo se basa en medir el tiempo que emplea una señal de infrarrojos desde que sale de la cámara hasta incidir en un objeto y volver. A partir de esta medida tendremos implícita la distancia, es decir, esta cámara al realizar una captura del entorno tendrá en cada pixel la información de la distancia de ese punto de la imagen, por ello este sensor aporta información en 3D del entorno.

Llegados a este punto podemos apreciar dos aspectos importantes, por un lado, la necesidad de verificar que se puede obtener la medida de distancia con precisión; y por otro lado nos encontramos en el punto de partida para desarrollar una aplicación basada en la medida de distancia.

En este trabajo se investiga sobre la precisión y el rango de distancias con la que mide este sensor (OPT8241) y a partir de conseguir una medida de distancia aceptable se investigarán las fases necesarias para llegar al sistema de posicionamiento final.

En este proyecto se realiza solo la validación del OPT8241 como sensor de medida de distancias y se plantean las fases posteriores que darán lugar al sistema final.

Una vez se garantiza que las medidas de distancia son precisas en el rango de trabajo del sistema a desarrollar, en la siguiente fase habría que investigar sobre 2 cosas fundamentales: Un algoritmo que permita detectar las marcas automáticamente y otro que permita identificarlas.

En este punto tenemos un sistema que obtiene la distancia a las marcas diferenciando cual es cada una, habría que implementar el algoritmo de localización para dar la posición de la cámara mediante trilateración.

El paso final sería diseñar un espacio de posicionamiento concreto en el que se debe realizar un estudio previo de como situar las marcas para que la cámara este posicionada en todo el espacio.

En este proyecto se dan las bases para realizar dicha tarea, se define la celda mínima de posicionamiento y se dan unas pautas de posibles ampliaciones con el fin de cubrir espacios interiores de diferentes tamaños.

1.1. Objetivos

Acorde con la introducción, los objetivos a lograr son:

- Comprender como funciona la tecnología que rige a una cámara de tiempo de vuelo y qué mejoras puede aportar frente a otras tecnologías que permiten realizar posicionamiento en interiores.
- Aprender el funcionamiento de un dispositivo concreto. En este caso se trata del OPT8241, que consiste en una placa de evaluación con un sensor TOF como el de las cámaras comerciales.
- Diseñar un entorno de pruebas para la validación del sensor.
- Caracterizar este sensor, tanto en precisión como en rango de medidas de distancia.
- Realizar una calibración del sensor con el objetivo de mejorar la precisión.
- Automatizar el procedimiento de obtención de medidas y lograr que este pueda corregir o compensar los errores que pueda introducir la cámara en la medida de distancia que proporciona de cada pixel.
- Detección de objetos (marcas), con la información de distancia de tres marcas diferentes se puede obtener la posición de la cámara. Es decir, usaremos las marcas como puntos de referencia.
- Proponer una celda de posicionamiento a partir de la caracterización del ángulo de visión de la cámara y la posición de las marcas, así como evaluar la escalabilidad del sistema a desarrollar.

1.2. Estructura del documento

Este TFG constará de los siguientes capítulos:

- I. **Introducción:** En este apartado se ha introducido el contexto del problema que se pretende abordar, es decir, se justifica la investigación de este proyecto. También se han especificado los objetivos a lograr y la estructura del documento.
- II. **Fundamentos Teóricos:** En este capítulo se incluyen aspectos teóricos útiles para la comprensión para la comprensión de este proyecto. Fundamentalmente se definen los principios teóricos que rigen a una cámara de tiempo de vuelo y el funcionamiento de método de trilateración orientado a nuestro sistema.
- III. **Desarrollo práctico:** En primer lugar, se especifican los datos técnicos del sensor OPT8241, ya que es el elemento central del que tendremos que conocer a fondo las posibilidades que ofrece. Con esto se realiza una primera prueba para la selección de un perfil de trabajo, para posteriormente realizar las calibraciones y pruebas finales de caracterización sobre un único perfil.
- IV. **Sistema de posicionamiento propuesto:** En este capítulo se detalla de manera práctica como sería el procedimiento de trilateración en un escenario con 3 marcas, ya que tres es el número mínimo de marcas que se necesitan para obtener la posición. Este escenario sería el ideal, pero en un escenario realista en el que se quiera cubrir un espacio de posicionamiento mayor, es necesario tener numerosas marcas, por ello en este apartado se define la celda mínima de posicionamiento.
- V. **Conclusiones y líneas futuras:** Este es el capítulo final donde se extraen las conclusiones a las que da lugar el proyecto, y se proponen las siguientes fases que habría que realizar para llegar a la aplicación final de posicionamiento en interiores.

2. Fundamentos teóricos

En este capítulo se explicarán los fundamentos teóricos que son útiles conocer para abordar este proyecto. En primer lugar, hay que hacer referencia al principio básico de funcionamiento del GPS, ya que este se parece en cuanto a conceptos, y posibilita hacer un símil con el sistema de posicionamiento que se pretende desarrollar.

Dentro de este apartado se expone detalladamente la base teórica por la que se rige una cámara tiempo de vuelo (TOF), ya que el objeto de estudio de este proyecto es estudiar una cámara TOF concreta (OPT8241), para validar su uso en el campo de aplicación deseado, es decir, para realizar posicionamiento en interiores mediante las medidas de distancia que esta cámara proporciona.

2.1. GPS. Sistema de Posicionamiento Global

Actualmente tener un sistema de posicionamiento en interiores robusto, fiable y preciso es una tarea complicada que la ingeniería está tratando de resolver. Existen diferentes líneas de investigación en función de las necesidades que tenga cada aplicación que requiera del uso de un sistema de localización.

El GPS es una tecnología que se desarrolló por el departamento de defensa de EEUU con fines militares, pero que con los años derivó en un uso civil de tal manera que hoy en día multitud de aplicaciones dependen de este sistema. Por ello el GPS funciona bajo cualquier condición climática, en cualquier lugar del mundo y las 24 horas del día.

Es un sistema de navegación por satélite basado en la emisión de ondas electromagnéticas por parte del satélite y la recepción de estas en la tierra. Es necesario conocer la velocidad de la onda y el tiempo que ha transcurrido en el trayecto, pudiendo determinar así la distancia entre emisor y receptor. Es necesario hacer referencia al método de trilateración, de tal forma que podemos tener ubicados los emisores y con ello obtener la posición de otros puntos (receptores) ya sean fijos o móviles.

La relación que el GPS tiene con el sistema de posicionamiento en interiores que se pretende desarrollar difiere en muchos aspectos, por ello hay que destacar aquellos que comparten. Estos son, el método de trilateración, y el objetivo final que es obtener la posición.

Para que el procedimiento de trilateración sea lo más preciso posible es necesario conocer exactamente la posición de los satélites. Para ello se tienen diferentes estaciones de control fijas, distribuidas en todo el mundo. Es decir, que un sistema de posicionamiento requiere conocer con precisión la posición de los puntos de referencia que utiliza.

Una vez tenemos los satélites bien ubicados, estos serán nuestros puntos de referencia para que el mecanismo de trilateración, explicado a continuación, sea fiable.

Aunque en la práctica no es exactamente así, vamos a explicar el método con 3 satélites ya que es el mínimo necesario para poder obtener la posición de un receptor.

2.2. Trilateración

[15] El satélite emite una señal para que el receptor (elemento a posicionar) la capte con una hora y distancia determinadas. Con esta información somos capaces de obtener la distancia entre el satélite y el receptor dando lugar a una circunferencia con centro en el satélite, de tal forma que el receptor GPS puede encontrarse en el lugar geométrico de la misma según se muestra en la Figura 1.

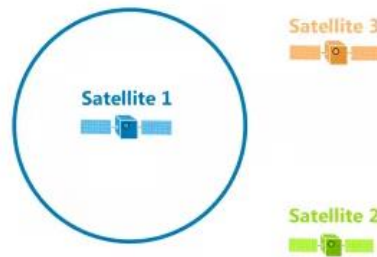


Figura 1: Trilateración, distancia satélite 1 [15]

Si ahora tenemos en cuenta la señal de un segundo satélite, tendremos la distancia a la que se encuentra del receptor y por lo tanto podemos trazar otra circunferencia donde sabemos que se encuentra el receptor, en la Figura 2 podemos apreciar que en la intersección de ambas circunferencias da lugar a dos puntos posibles donde puede estar ubicado el receptor.

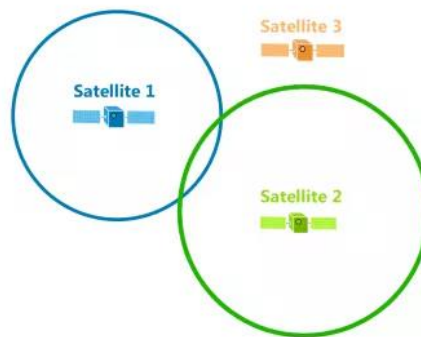


Figura 2: Trilateración, distancia satélite 2 [15]

Por ello, es necesario un tercer satélite para poder resolver el problema matemático y conocer la ubicación exacta del receptor. La solución es el punto de corte de las 3 circunferencias según se muestra en la Figura 3.



Figura 3: Trilateración, distancia satélite 3 [15]

A medida que el receptor GPS se mueva, las distancias con los respectivos satélites también lo harán, desplazándose así el punto de corte que se genera entre las 3 circunferencias.

En realidad, el sistema GPS no es tan simple como ha sido descrito, ya que tiene que lidiar con multitud de problemas, pero la explicación dada nos sirve de introducción al sistema de posicionamiento en interiores que se pretende desarrollar. Este, está basado directamente en el método de trilateración en el que usa marcas pasivas como puntos de referencia conocidos, en lugar de satélites. Además, en este sistema el elemento a posicionar es una cámara TOF, la cual es el único elemento activo del sistema, siendo el emisor y el receptor.

2.3. Sistema de localización propuesto

Extrapolando la explicación de trilateración basada en la distancia entre emisores y receptor, vamos a utilizar nuestra cámara TOF como punto a posicionar, es decir, la cámara sería el receptor en la tecnología GPS. Para realizar la trilateración y conseguir posicionar la cámara es necesario tener como mínimo 3 puntos de referencia conocidos y la distancia a la que se encuentra cada uno de la cámara TOF.

La idea para solucionar este problema es usar la cámara TOF, la cual puede proporcionar información de distancia entre ella y los diferentes puntos del entorno, de tal forma que tengamos 3 objetos (marcas) como puntos de referencia. Al obtener una imagen del entorno con la cámara TOF podemos conocer la distancia a la que se encuentra cada marca y realizar el procedimiento de trilateración para determinar la posición de la cámara respecto a las referencias conocidas.

Aunque, una vez obtenidas las distancias el procedimiento de trilateración es igual que en GPS, en el sistema propuesto la obtención de medidas y el concepto de emisor y receptor es distinto, ya que una cámara TOF actúa como emisor cuando emite una señal de infrarrojos al entorno y actúa como receptor cuando capta la señal de infrarrojos reflejada de los diferentes elementos del entorno. Gracias a la señal de infrarrojos la cámara TOF es capaz de obtener la distancia a cada objeto de la imagen, es decir, cada pixel tiene almacenada información de la distancia a la que se encuentra cada objeto de la imagen.

En conclusión, tendremos como único elemento activo, la cámara TOF, mientras que las referencias serán marcas pasivas cuyas posiciones son conocidas.

Una vez descritos los elementos necesarios para poder realizar el posicionamiento, queda pendiente la forma en que van a ser posicionados estos dentro del espacio de localización. La manera en que se coloquen las marcas dependerá mucho del espacio de localización concreto, pero a lo largo de este proyecto trabajaremos bajo la suposición de que la cámara TOF irá situada en el plano horizontal apuntando al techo y cercana al suelo para obtener un ángulo de visión mayor sobre techo. En el techo o cerca de él es donde se situarán las diferentes marcas cuyas posiciones serán conocidas por el sistema de localización.

Esto nos da gran información sobre el sensor 3D que hay que utilizar, ya que las distancias de un espacio interior son similares en cuanto a la distancia entre el suelo y el techo, dando lugar a medidas aproximadas de entre 3 y 5 metros de altura. Por ello, un cámara de tiempo de vuelo que trabaje en ese rango de distancias puede ser utilizado en multitud de espacios interiores, excepto en aquellos que tengan otras dimensiones. En ese caso, habría que hacer un estudio concreto sobre que sensor de profundidad cumple mejor su función en dicho espacio.

En el apartado 2.4 se justifica el uso de una cámara de tiempo de vuelo para el sistema de posicionamiento descrito.

2.4. Cámara de tiempo de vuelo

Son muchas las tecnologías existentes en lo que se refiere a cámaras/sensores de profundidad o también conocidos como sensores 3D. En [1] podemos ver diversas posibilidades, valorando las características de cada dispositivo y justificando el porqué de usar una cámara TOF en lugar de otra tecnología.

Para justificar el uso de la cámara TOF tenemos que atender a dos cosas fundamentales, una es el sistema de posicionamiento propuesto (2.3) y la otra son las características que puede ofrecer la cámara TOF.

Una cámara de tiempo de vuelo tiene las siguientes ventajas:

- Proporciona una medida de distancia precisa en un rango aproximado de hasta unos 10 metros, lo que hace que sea válida para las dimensiones del espacio interior descrito.
- Son compactas y en general de coste medio, aunque dependerá del modelo.

- Proporcionan una alta velocidad de trabajo (adquisición de datos), lo que las hace idóneas si el objetivo final es una aplicación en tiempo real.
- No son afectadas por los cambios de iluminación del entorno, es decir que no necesita de una iluminación mínima para su funcionamiento, como por ejemplo lo haría una cámara RGB.
- La información sobre la distancia de cada pixel viene dada en ejes X, Y, Z. Lo que puede ser de gran utilidad a la hora de situar las marcas a detectar, facilitando los posibles algoritmos para una rápida detección.

Por las características descritas, una cámara TOF parece una buena solución para el sistema de posicionamiento propuesto. En este proyecto no se usa una cámara TOF compacta y encapsulada como puede ser, por ejemplo, la cámara Basler (Figura 5), si no que utilizaremos una placa de evaluación (Figura 4) de tal forma que tendremos acceso completo al hardware. Aunque este proyecto no sigue esa línea de investigación, sería muy interesante conocer el hardware, ya que se podría aplicar un tratamiento distinto al que hace la cámara, es decir, obtendríamos las señales en crudo e investigaríamos sobre el tratamiento de dichas señales.



Figura 4: Texas Instruments OPT8241-CDK-EVM 3D ToF Sensor Evaluation Module[16]



Figura 5: Cámara Basler[17]

Una vez justificado el uso de una cámara TOF, es el momento de conocer este tipo de cámara en detalle.

Una cámara de tiempo de vuelo es un dispositivo que proporciona una imagen con información en 3 dimensiones, en coordenadas (x, y, z) con el origen situado en la lente de la cámara, de tal forma que se puede obtener la distancia entre un objeto y la cámara como el módulo de esas coordenadas, esta moderna tecnología ha revolucionado la industria de la visión. Dentro de esta existen diferentes variantes, aunque todas se basan en el mismo principio, el tiempo de vuelo.

El tiempo de vuelo hace referencia al tiempo que tarda una señal de infrarrojos en viajar desde los emisores de infrarrojos de la cámara TOF, hasta que el haz de infrarrojos emitido es reflejado debido a los elementos del entorno volviendo al receptor (lente de la cámara y array de píxeles). Gracias a esa señal se puede obtener la información de distancia con la diferencia de fase entre las señales emitida y recibida. En la Figura 6 se puede ver de manera simple el funcionamiento, la señal roja es la emitida, esta se refleja con el objeto devolviendo la señal azul al array de píxeles (sensor receptor de infrarrojos), ahora la cámara obtiene la diferencia de fase entre ambas señales, lo cual permite obtener la distancia al objeto. [3]

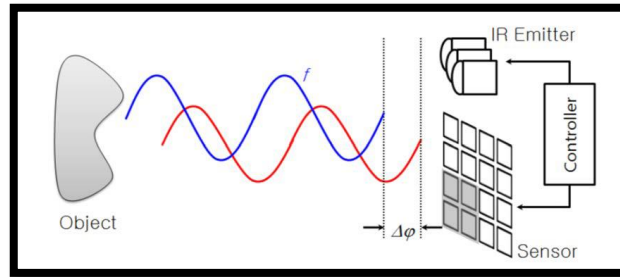


Figura 6: Señal IR y tiempo de vuelo [3]

En la Figura 7 podemos ver los componentes generales que forman una cámara TOF, aunque cada modelo de cámara específico pueda diferir ligeramente de este esquema, con él, nos hacemos una idea de los elementos que integran este tipo de cámaras. [4]

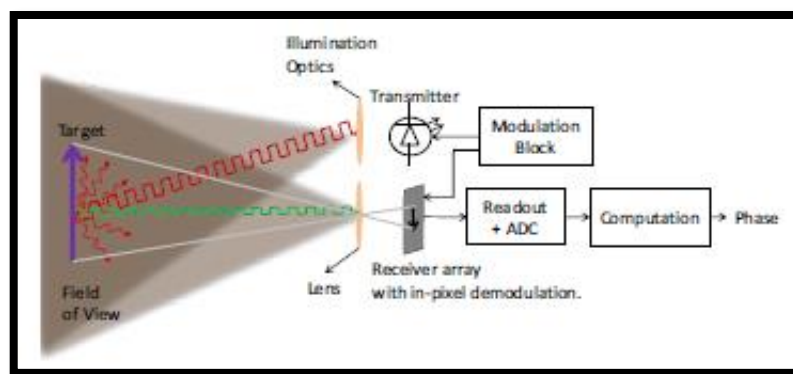


Figura 7: Componentes cámara TOF [4]

Los elementos son:

- Emisor de luz: Un componente para generar la onda infrarroja (IR), podemos tener dos variantes para este elemento, LED o LASER, al cual hay que acoplarle un difusor óptico para que ilumine toda la escena. Ambos operan en frecuencias cercanas al infrarrojo, en torno a los 850 nm de longitud de onda (invisible para el ojo humano).
- Óptica: Una lente para enfocar la luz en el array de pixeles receptores. Dependiendo de las dimensiones de esta lente obtendremos diferentes campos de visión de la escena (ángulos).
- Chip receptor: Es el sensor que captura los reflejos de la luz emitida, la cual proviene de la escena iluminada. Consta de una matriz de pixeles (normalmente CCD o CMOS). Esta matriz define la resolución de la cámara. Este sensor, junto con algún elemento como el ADC es el encargado de generar la información de profundidad.
- Periféricos: Añaden características y mejoran al sistema, por ejemplo, un periférico es el controlador de modulación, el cual define la frecuencia de modulación y las características de la señal.
- Herramientas de desarrollo: Interfaces digitales sencillas para el usuario que permiten el desarrollo de aplicaciones más concretas.

Para conocer más en detalle el principio de funcionamiento de estas cámaras tenemos que, el proceso TOF se puede hacer de dos formas, esto da lugar a dos tipos de cámaras, las cuales se describen detalladamente a continuación.

2.4.1. Cámaras de modulación continua

En este caso la señal IR es emitida continuamente mientras que el receptor mide la diferencia de fase entre la señal emitida y la recibida. Tanto en la Figura 6 como en la Figura 7 podemos ver que la onda es continua, ya sea modulada por un seno o por una onda cuadrada, cuyo hardware es más sencillo de realizar.

Estos sensores en comparación con las cámaras que operan con modulación pulsada son peores en cuanto a longitud de medida de distancia, es decir, la modulación pulsada permite medir distancias más lejanas y les afecta menos la iluminación del entorno. Por ello, una cámara de modulación continua es válida si nuestra aplicación es para espacios interiores donde la iluminación del entorno es débil y no se necesita que la cámara tenga un rango de medidas amplio.

A continuación, vamos a explicar la forma en la que se obtiene la medida de profundidad en cada pixel. [2]

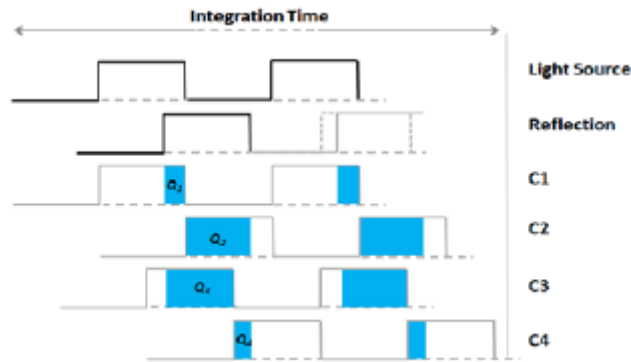


Figura 8: Muestras modulación continua [2]

Cada pixel de la matriz toma 4 muestras de la señal IR recibida, C1, C2, C3 y C4, desfasadas entre sí $\pi/2$ radianes (Figura 8). A partir de la carga eléctrica acumulada, Q1, Q2, Q3 y Q4, se obtiene la diferencia de fase de la siguiente forma:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Q3 - Q4}{Q1 - Q2}\right)$$

Con la diferencia de fase, la velocidad de la luz y la frecuencia de modulación de la señal, podemos obtener la distancia:

$$d = \frac{C}{4\pi f} \varphi$$

A partir de esta fórmula se puede determinar la distancia máxima de medida de la cámara. Si sustituimos el desfase φ por 2π , que es el máximo desfase que se puede dar sin que haya ambigüedad en la medida, obtenemos que la distancia máxima es la siguiente:

$$d_{max} = \frac{C}{2f}$$

Para distancias mayores a d_{max} estaremos en múltiplos de la distancia de tal forma que se podría obtener la distancia como (siendo n un numero entero):

$$(n \times d_{max}) + d = d_{real}$$

En la medida del pixel se puede obtener información de amplitud (A) y del offset (B) añadido a la señal, debido a la iluminación de fondo:

$$A = \frac{\sqrt{(Q1-Q2)^2 - (Q3-Q4)^2}}{2} \quad B = \frac{Q1+Q2+Q3+Q4}{2}$$

2.4.2. Cámaras de modulación pulsada

[2] Este método puede parecer más sencillo ya que obtiene la medida de distancia de una forma más directa y no se ve tan afectada por la iluminación de fondo, pero tiene otro tipo de complejidades, por ejemplo, requiere de un hardware muy preciso para realizar las medidas de tiempo.

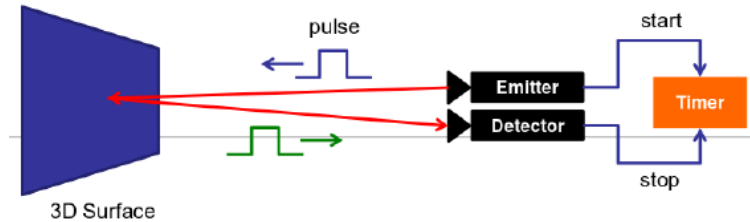


Figura 9: Modulación pulsada

En la Figura 9 vemos que a diferencia del método de modulación continua, aquí se ilumina la escena durante un breve incremento de tiempo (Δt), la energía reflejada es muestreada en cada pixel, utilizando dos ventanas desfasadas, C1 y C2, con el mismo incremento de tiempo (Figura 10).

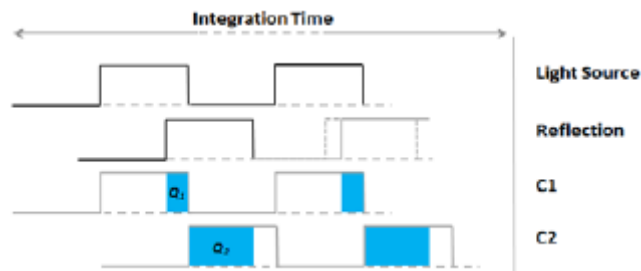


Figura 10: Muestras modulación pulsada

Las cargas acumuladas en esas muestras (Q1 y Q2) se miden y se utilizan para sacar la distancia utilizando la siguiente formula:

$$d = \frac{1}{2} c \Delta t \left(\frac{Q2}{Q1 + Q2} \right)$$

Aquí el valor de la d_{max} viene limitado por el intervalo del pulso:

$$d_{max} = \frac{c}{2} \times \Delta t$$

Utilizar este tipo de modulación puede tener ventajas ya que se transmite una gran cantidad de energía en un intervalo muy corto de tiempo. Este modo de trabajo hace que mejore la relación señal ruido teniendo un valor medio de potencia bajo.

2.5. Errores en las cámaras TOF

Como cualquier dispositivo electrónico, una cámara de tiempo de vuelo tiene diferentes fuentes de error, no solo las debidas a parámetros intrínsecos de la propia cámara, sino que también se generan diferentes errores en función del espacio de trabajo en el que nos encontremos. [5] Podemos diferenciar dos fuentes de error:

2.5.1. Errores sistemáticos

Los errores sistemáticos en las cámaras de tiempo de vuelo tienen una importante influencia en la precisión de medidas de distancia. Por ello será necesario realizar una calibración para eliminar estos errores al máximo. Los errores más comunes son:

- Wiggling error: Debido a señales sinusoidales no perfectas. Al generar la señal infrarroja emitida y la señal de referencia, se producen armónicos, los cuales no se tienen en cuenta en el proceso de obtención de la distancia, pero pueden corregirse con una calibración de parámetros dependientes de la frecuencia y la profundidad.
- Ruidos de patrón fijo en determinados píxeles. Este problema se origina debido a pequeñas diferencias en la capacidad de respuesta de cada pixel de la matriz, estas diferencias pueden ser causadas por variaciones en el tamaño de los píxeles, el material o la interferencia con los circuitos locales.
- Diferentes amplitudes, generadas por la iluminación y reflectividad no constantes.
- Variaciones de temperatura dan lugar a cambios en el número de portadores de los materiales semiconductores produciendo ciertos desajustes.

2.5.2. Errores no sistemáticos

Entre este tipo de errores podemos encontrar:

- El efecto multicamino origina errores e interferencias en la medida cuando la luz rebota en ciertos objetos haciendo que entre luz adicional a la cámara, es decir, luz que no proviene de la reflexión directa.
- Se pueden producir reflexiones dentro de la lente y del sensor dando lugar a dispersiones de luz.
- Objetos en movimiento dan lugar a errores.
- Errores en la medida cuando se supera la distancia de ambigüedad de la cámara. Esta distancia es la máxima (d_{\max} en el apartado anterior) a la que se puede situar un objeto para que la distancia proporcionada por la cámara sea la correcta, ya que, al obtener la distancia como la diferencia de fase de 2 señales, hay un momento en el que la fase que se está midiendo puede ser un múltiplo. Por ello, el rango de no ambigüedad se corresponde al primer múltiplo de fase. Si queremos medir a más distancia de la de ambigüedad, es necesario un método que indique el múltiplo de la fase. Para conocer en que múltiplo está el objeto a medir se puede hacer uso de la información de intensidad que la cámara proporciona.
- Píxeles voladores en las discontinuidades de los objetos de la escena. Estos dan lugar a medidas de distancia erróneas y se producen aleatoriamente, aunque con más frecuencia en las discontinuidades de los objetos.

2.6. Calibración de cámaras TOF

Debido a los errores sistemáticos del apartado anterior (2.5) es necesario tener calibrada la cámara de tiempo de vuelo para poder obtener medidas de profundidad lo más precisas posibles, reduciendo así, el efecto de los errores.

La calibración dependerá mucho del fabricante y modelo de la cámara, por ello, solo se nombran las posibilidades de calibración que ofrece la cámara estudiada en este proyecto (Figura 4: Texas Instruments OPT8241-CDK-EVM 3D ToF Sensor Evaluation Module).

Aunque la calibración se explicará y realizará de manera práctica más adelante, aquí se comentan teóricamente las posibilidades que este sensor ofrece en lo que se refiere a calibración.

El sensor diferencia entre “perfiles de calibración” y “calibraciones” de tal forma que un perfil de calibración puede tener una serie de calibraciones guardadas. Por lo tanto, los perfiles de calibración se diferencian unos de otros por las calibraciones que albergan en su interior.

Los tipos de calibración que la cámara permite son:

- Calibración de la lente.
- Calibración de frecuencia de modulación.
- Calibración de diafonía.
- Calibración de no linealidad.
- Calibración de temperatura.
- Calibración de fase común.
- Pixel-Wise.

En la referencia [6] se da información detallada sobre las calibraciones anteriormente nombradas.

El fabricante proporciona varios perfiles de calibración guardados en la memoria de la cámara, estos son seleccionables mediante el software (Voxel Viewer) que proporciona, este software permite al usuario crear nuevos perfiles añadiendo las calibraciones (realizadas por el usuario) deseadas en cada perfil.

3. Desarrollo práctico

En este capítulo se describe el trabajo realizado para la validación del sensor OPT8241 como sensor de medida de distancias para un sistema de posicionamiento (como el descrito 2.3). Hay que verificar que este sensor es capaz de medir distancias precisas en un rango de medidas similar al que se tendría en un espacio interior como el descrito. Para ello se han seguido las siguientes fases:

1. En primer lugar, explicaremos los aspectos técnicos necesarios del sensor, es decir, aquellos que será necesario conocer o tener en cuenta a la hora de realizar las pruebas, calibraciones y programas.
2. El fabricante proporciona varios perfiles de trabajo con sus correspondientes calibraciones, por ello la primera tarea será comprobar cómo de precisos son y hasta qué rango permiten medir. Para estas pruebas, al no saber cuál será el perfil definitivo que se elegirá como el mejor para la aplicación, las pruebas se harán únicamente en rayo directo, es decir, con el objeto/marca justo en frente de la cámara, sin hacer pruebas angulares.
3. Dependiendo de los resultados de la fase 2, investigaremos si podemos mejorar algún perfil de calibración de los que proporciona el fabricante, realizando las calibraciones que se consideren necesarias. En esta fase también se incluyen las pruebas de los nuevos perfiles calibrados, de tal forma que al terminar esta fase se decidirá un único perfil de trabajo sobre el que realizaremos las demás fases.
4. En este apartado se realizan pruebas de manera exhaustiva al perfil elegido en la fase anterior. Se hacen diversos tipos pruebas, de tal forma que el sensor quede caracterizado en un escenario de trabajo que simule la aplicación final a la que está orientada este proyecto. La prueba que se realiza en este apartado consiste situar la cámara y las marcas a una altura fija, moviendo las marcas por todo el ángulo de visión de la cámara. Además, estas pruebas se hacen en función del tiempo, es decir, misma medida sin modificar la escena (posición de la marca), pero en diferentes instantes de tiempo.
5. En este punto analizaremos los resultados obtenidos de la fase anterior y se justificará por que el sensor puede ser válido para el sistema de posicionamiento propuesto.

3.1. Módulo de evaluación OPT8241

El objetivo de esta sección es definir el sensor con el que vamos a trabajar y describir lo necesario para poder realizar y comprender las pruebas que este proyecto aborda. Los diferentes datasheet y manuales de usuario de este sensor los podemos encontrar en las siguientes referencias [2][6][7][8][9].

3.1.1. Características generales. Hardware y software

Para el desarrollo de este proyecto, y como elemento central de estudio, disponemos de la placa de evaluación OPT8241 de Texas Instrument, la cual podemos ver en la Figura 11. Aunque a lo largo del proyecto hablemos de cámara TOF, en realidad este dispositivo es una cámara TOF “desarmada”, y la trataremos como un sensor de profundidad, ya que nuestro objetivo es obtener una medida de distancia fiable respecto a un objeto (marca) que se utiliza como referencia en el sistema de posicionamiento anteriormente descrito.

El módulo de evaluación OPT8241 (EVM, EVAluation Module) está diseñado para ser configurable y modular en una amplia gama de puntos operativos, es decir, que no está diseñado para una aplicación específica, sino que está pensado para multitud de usos en función de la configuración que dé el usuario. La cámara proporciona la ubicación tridimensional de cada píxel, es decir, que cada píxel se puede situar como un punto en un espacio en 3 dimensiones (x, y, z), lo que permite mapas de profundidad precisos para el dimensionamiento 3D, la navegación robótica, los gestos 3D y la automatización de edificios.

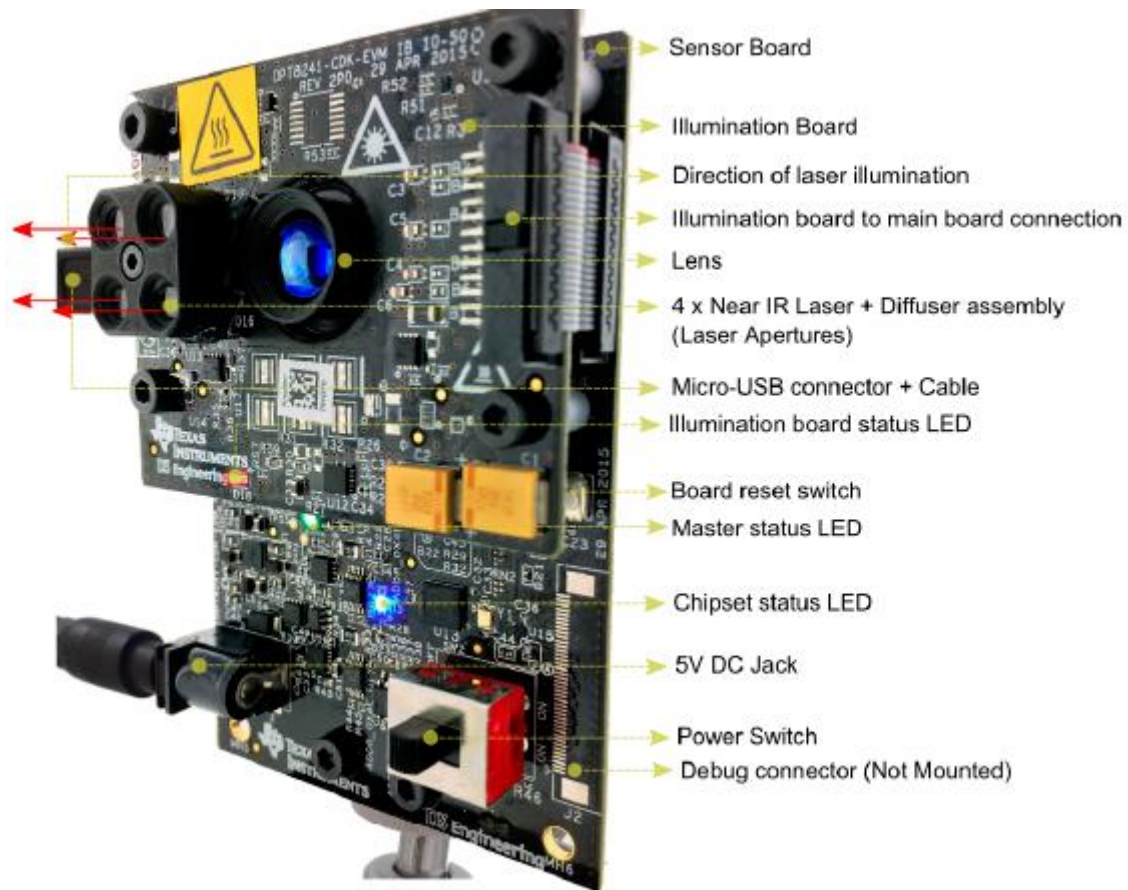


Figura 11: Imagen detallada del OPT8241 [7]

En la Figura 11 vemos los elementos hardware más relevantes que permiten manejar, conectar u obtener información visual sobre el estado de la cámara.

De la Tabla 1 son de especial interés la resolución de la cámara y ángulo de visión. Estos parámetros serán fundamentales en el desarrollo del proyecto ya que la resolución de la imagen determinará el tamaño de las marcas a usar, y el ángulo de visión determinará el tamaño de una celda de posicionamiento, es decir, que dentro del ángulo de visión de la cámara tendrían que estar las marcas necesarias para posicionar.

Item	Value (Typical)
External power supply requirements	3 A at 5 V
Pixel resolution	320 × 240
Field of View	87° Diagonal. 74 (H) × 59 (V)
Maximum average optical output power	1.5 W
Connectivity	USB 2.0
Operating Conditions	0°C to 40°C (Ambient)

Tabla 1: Datos técnicos OPT8241

Aunque en este proyecto no se focaliza en el hardware del sensor, en posibles líneas futuras se podría investigar en las señales que este tiene, ya que como se ha comentado antes, los diferentes módulos del sensor mostrados en la Figura 12 se encuentran separados en la placa de evaluación y, por tanto, accesibles para el usuario de forma independiente, por lo que esta cámara de tiempo de vuelo es idónea para la investigación del hardware.

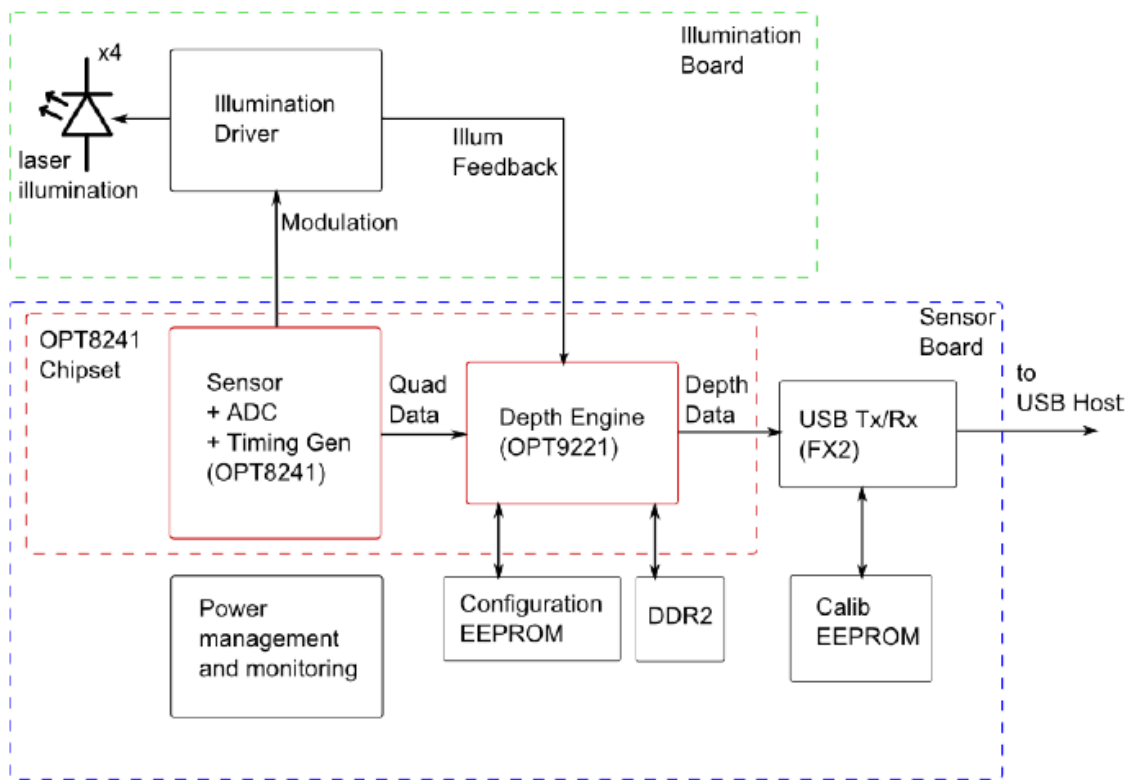


Figura 12: Hardware OPT8241 [8]

De este esquema de bloques destacamos la parte roja ya que es donde se realizan la mayoría de las operaciones, se diferencian en ella dos elementos claros:

- El sensor OPT8241, que se encarga de proporcionar la modulación para la emisión de la señal infrarroja que emiten los LASERS. También capta la señal rebotada del entorno capturando 4 muestras por pixel (cámara de modulación continua) y digitalizándolas mediante un ADC para pasar estos datos al controlador.
- El OPT9221 es el controlador digital de esta cámara, por ello se encarga de controlar los diferentes periféricos, además de realizar las operaciones necesarias para obtener la imagen de profundidad en función de los datos obtenidos por el OPT8241.

Otro elemento muy importante es el software que proporciona el fabricante ya que de él dependerá lo accesible que sea esta cámara. El software que Texas Instrument proporciona es “Voxer Viewer” cuya pantalla principal podemos ver en la Figura 13.

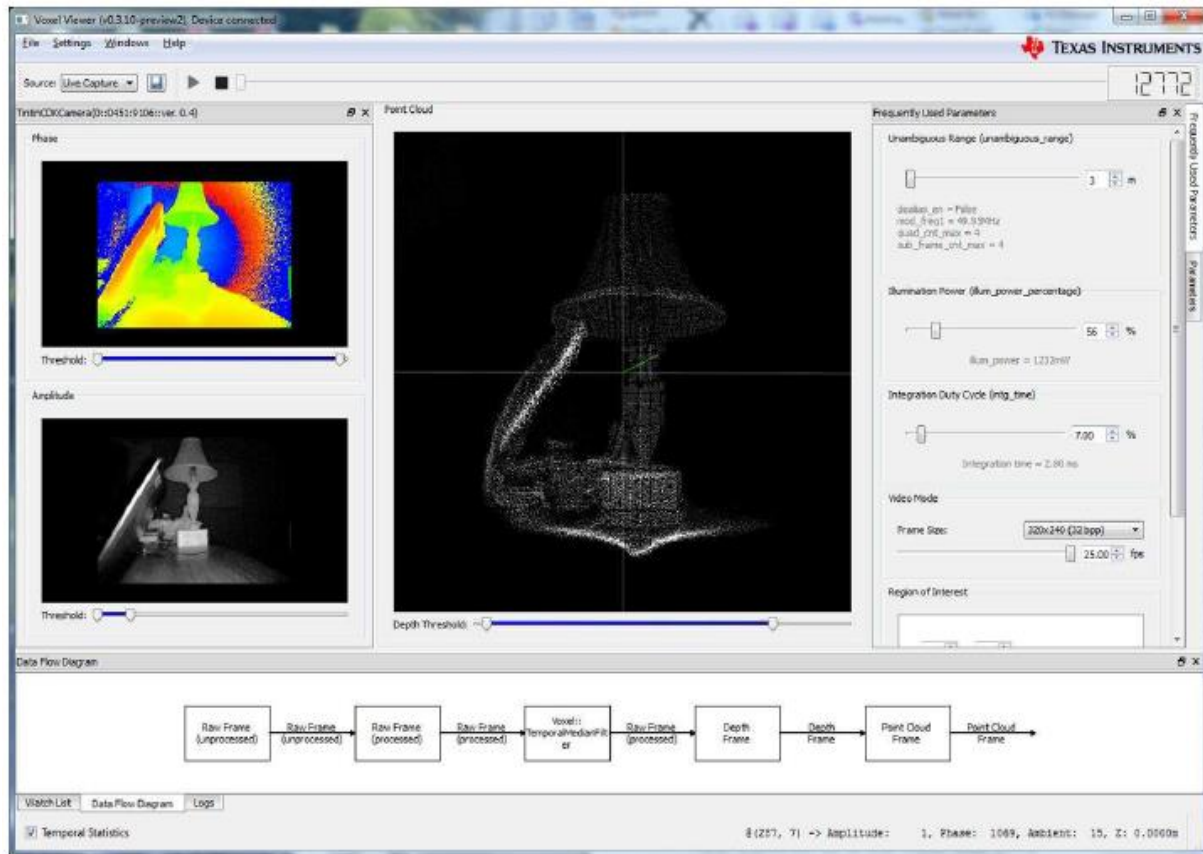


Figura 13: Pantalla Voxel Viewer [6]

En esta pantalla se encuentran accesibles todas las posibilidades que el SW permite. Este, es sencillo y fácil de usar, y las funcionalidades que implementa son:

- Permite ver imágenes de amplitud, fase y nube de puntos. La nube de puntos se puede extraer como un fichero PCD (Point Cloud Data), este fichero es muy útil a la hora de medir distancias, por ello se explicará detalladamente la información que contiene en el apartado 3.1.3.
- Permite seleccionar el perfil de calibración a utilizar. También posibilita añadir nuevos perfiles de calibración, es decir, tiene una interfaz de usuario para realizar diferentes calibraciones, esta opción se utiliza en el apartado 3.3 donde se realizan dos perfiles de calibración diferentes.
- Las dos partes anteriores son en las que más se apoya este proyecto, pero este software también permite ver el contenido de los registros internos, ver la estructura a nivel de bloques por el que pasa la señal pudiendo añadir diferentes filtrados de señal y programar el dispositivo gracias a la memoria EPROM que alberga.

Dado que vamos a trabajar sobre las dos primeras funcionalidades descritas, es necesario profundizar en los perfiles de calibración que el fabricante proporciona y en el fichero PCD.

3.1.2. Perfiles de calibración por defecto

En este apartado describen estos perfiles, y en un apartado posterior se realizarán pruebas donde se verifica el funcionamiento correcto de estos perfiles, es decir, estudiaremos si los perfiles que proporciona el fabricante miden de forma precisa y si el rango de medidas que permiten es válido para el sistema de posicionamiento en el cual se utiliza este sensor.

Desarrollo práctico

Los perfiles predeterminados, los cuales almacenan la configuración HW en la memoria de la cámara, son:

- Lens Only.
- Short Range.
- Long Range.
- High Ambient.
- Metriculous Long Range.
- Metriculous Short Range.
- No Calibration.

En la información que el fabricante proporciona encontramos lo que se denomina “Perfil padre”, un perfil padre hace referencia a un perfil que se usa como base para la creación de uno nuevo, es decir, que cuando seleccionemos la opción de crear un nuevo perfil de calibración podremos hacerlo desde cero seleccionando las calibraciones que queramos, o podemos seleccionar un perfil padre del que heredaremos las calibraciones que este perfil contenga, pudiendo añadir o modificar las calibraciones que queramos.

El uso de un perfil padre tendrá sentido cuando las calibraciones que alberga en su interior están bien hechas y solo busquemos realizar una calibración de un solo tipo para estudiar el efecto que produce esa calibración en las medidas que proporciona la cámara.

En resumen, hay que resolver la siguiente cuestión: Crear un perfil nuevo desde cero realizando todas las calibraciones, o utilizar un perfil padre solo realizando las mínimas calibraciones posibles.

El criterio a seguir será comprobar si algún perfil cumple los objetivos que necesita la aplicación y de ser así, utilizarlo como perfil padre y estudiar los efectos en la medida de distancia que se producen al realizar una modificación de las calibraciones que trae ese perfil. De no encontrar ningún perfil que cumpla las necesidades de nuestro sistema tendremos que realizar uno desde cero.

En la Tabla 2 se muestran las especificaciones de los tres perfiles padre que da el fabricante. A partir de Long Range y Short Range el propio fabricante ha desarrollado otros dos a partir de esos (usándolos como perfil padre), son Metriculous Long Range y Metriculous Short Range, a los cuales el fabricante realiza la calibración Pixel-Wise cuyos perfiles padre no la tenían realizada.

Parameter	Long Range	Short Range	High Ambient
Parent Profile	Lens Only	Long Range	Long Range
Frame rate (fps)	30	60	30
Sub-Frames	4	2	4
Quads	6	6	6
Integration Duty Cycle (%)	30	10	5
De-aliasing	Enabled	Enabled	Enabled
Illumination Power (%)	100	40	100
Unambiguous Range (m)	10	5	5
Base Frequency (MHz)	60	60	60
De-aliasing Frequency (MHz)	40	40	40
Usable Range	4 m	1.5 m	1.5 m
Calibrations performed	Temperature, Common phase offset, Pixel to Pixel, Pixel cross-talk ⁽¹⁾	Common phase offset ⁽²⁾	Common phase offset ⁽²⁾

Tabla 2: Características de los perfiles de calibración del fabricante [6]

El fabricante añade un perfil en el que solo tiene calibrada la lente, y un perfil en el que no tiene realizada ninguna calibración para poder comparar resultados.

La calibración es sensible a los cambios de parámetros del sistema. En la Tabla 3 se muestran los parámetros que obligan a realizar de nuevo la calibración si estos se modifican desde la ventana de parámetros que el SW proporciona.

Parameter Changed	Re-Calibration Required?		
	Common phase offset	Pixel-to-Pixel Differences	Non-Linearity Calibration, Pixel Cross-Talk Calibration
Unambiguous range (any change in modulation frequency)	Yes	Yes	Yes
Frame rate, number of quads, number of sub-frames (any change in quad timing)	Yes, but to a small extent	No	No
Integration duty cycle	Yes, but to a small extent	No	No
Illumination power	Yes	No	No

Tabla 3: Parámetros que al modificarse requieren realizar una nueva calibración [6]

3.1.3. Fichero PCD, Point Cloud Data

Este fichero es el que proporciona nuestra cámara TOF, en él están almacenadas las coordenadas (X, Y, Z) y la información de intensidad para cada pixel. El nombre “nube de puntos” se debe a que cada pixel se puede situar en una posición concreta del espacio. Esto es posible gracias a la geometría proyectiva que permite una correspondencia entre los puntos de la escena y los pixeles de la cámara. De tal forma que si representamos en unos ejes la información que proporciona la cámara de cada pixel estaríamos viendo la imagen como un conjunto de puntos, donde cada pixel es un punto con coordenadas (x, y, z) situado en un espacio 3D.

Una gran ventaja que tiene usar este fichero es la capacidad de almacenar y procesar conjuntos de datos de nubes de puntos organizados, esto es de gran importancia para aplicaciones en tiempo real como pretende ser nuestro sistema de posicionamiento en un futuro, aunque en este proyecto solo se aborde la validación de la cámara de tiempo de vuelo, también es importante tener expectativas de futuro, es decir, que suponiendo que este sensor sea preciso y se pueda utilizar en la aplicación, una cosa crítica a tener en cuenta sería el tiempo de procesamiento de los datos, ya que en una cámara convencional (2D) se realiza el procesamiento de la imagen, mientras que en el fichero PCD que proporciona la cámara TOF es una búsqueda rápida de datos. Esto para algunas aplicaciones es suficiente y mucho más rápido.

Cada archivo PCD contiene un encabezado que identifica y declara ciertas propiedades de los datos de la nube de puntos almacenados en el archivo. La cabecera de un PCD debe estar codificada en ASCII. [10]

Los campos que se definen y especifican en la cabecera del fichero son los siguientes:

- VERSION.
- FIELDS: En él se especifican los campos que contiene el fichero. En el caso de esta cámara este campo es “x y z i” que quiere decir que en cada línea de datos el primer valor es la distancia al eje x, el segundo al y, el tercero al z, y el último es la intensidad (esta cámara no proporciona información de colores RGB).
- SIZE: Especifica el tamaño de cada dimensión en bytes. En nuestro caso este campo es “4 4 4 4”, es decir, que cada campo x, y, z, i, ocupa 4 bytes.
- TYPE: Especifica qué tipo de variable es cada dimensión, en nuestro caso este campo es “F F F F”, esto quiere decir que cada campo x, y, z, i, son datos tipo float.
- COUNT: Este campo se usa para especificar cuantos elementos tiene cada dimensión, en el fichero proporcionado por nuestra cámara tenemos 4 dimensiones (x, y, z, i) de un solo elemento.

- WIDTH y HEIGHT: Estos elementos se utilizan para saber la ordenación de los píxeles en el fichero, es decir, nuestra cámara al tener una resolución de 320 x 240 píxeles los campos serían esos números respectivamente, pero esto no sucede así, sino que el fichero que proporciona la cámara tiene un WIDTH de 76800 (320 x 240) y un HEIGHT de 1. Se explica posteriormente cómo se ordenan los píxeles de la cámara en el fichero PCD.
- VIEWPOINT: Especifica un punto de vista de la imagen, este campo no lo usaremos ya que está pensado para construir transformaciones entre diferentes sistemas de coordenadas.
- POINTS: Especifica el número de puntos que tiene la nube, este número coincide con el número de píxeles que tiene la cámara, siendo 76800.
- DATA: Especifica el formato de los datos que se encuentran a partir de esta línea del fichero, en nuestro caso los datos son en “ascii”.

Un aspecto muy importante es conocer la correspondencia entre el píxel de una imagen de nube de puntos y su posición en el PCD. En el caso de esta cámara tenemos 320 píxeles en horizontal por 240 en vertical haciendo un total de 76800 píxeles, los cuales coinciden con los datos que alberga el PCD. Estos píxeles se guardan en el fichero PCD por líneas, de tal forma que una línea del fichero PCD es un píxel de la cámara. Estos píxeles cuyas coordenadas en la imagen de nube de puntos llamaremos (x, y) se guardan uno detrás de otro en el fichero PCD. El primer píxel en guardarse será el (0, 0) y el último el (319, 239), estos se corresponden con la esquina superior izquierda y la inferior derecha respectivamente.

La cámara guarda los píxeles comenzando por el (0, 0) (esquina superior izquierda) y aumenta la coordenada x hasta llegar al final de la línea manteniendo la y=0. Al haber guardado toda la línea y=0 de la imagen de nube de puntos, tendremos que se corresponde con 320 datos en el fichero PCD, ya que 320 es lo que ocupa una línea en el eje horizontal (eje X) de la imagen de nube de puntos. La siguiente línea será la Y=1 guardando los 320 píxeles del eje X de la imagen de la nube de puntos, y así se hará sucesivamente hasta llegar a la línea y=239.

Sabiendo que la cámara ordena así los píxeles en este fichero, es muy fácil y rápido obtener el dato del fichero PCD en la que se encuentra un píxel cualquiera (x, y) de la nube de puntos. Por ejemplo, supongamos que queremos saber en qué línea está el píxel de coordenadas (160, 120). El cálculo consiste en multiplicar 320 píxeles que tiene cada línea (en la imagen de nube de puntos) por los 120 que es el desplazamiento de la coordenada ‘y’, con este cálculo estamos en el primer píxel de la línea 120, por lo que solo falta sumar las 160 posiciones del desplazamiento de la coordenada ‘x’. La ecuación general sería la siguiente:

$$n^{\circ} \text{ dato PCD} = (y * 320) + x$$

En la Figura 14 vemos un fichero PCD abierto con el bloc de notas, en él vemos las cabeceras anteriormente descritas. Después de la línea DATA están 76800 líneas, las cuales se corresponden con los píxeles de la cámara, ordenados según se ha descrito.

```
# .PCD v.7 - Point Cloud Data file format
VERSION .7
FIELDS x y z i
SIZE 4 4 4 4
TYPE F F F F
COUNT 1 1 1 1
WIDTH 76800
HEIGHT 1
VIEWPOINT 0 0 0 1 0 0 0
POINTS 76800
DATA ascii
0.0000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 4.8828125000000000e-04
0.0000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 4.8828125000000000e-04
0.0000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 0.0000000000000000e+00 4.8828125000000000e-04
```

Figura 14: Imagen de un PCD

3.2. Ensayos en rayo directo

En este apartado se realizan las pruebas sobre los perfiles de calibración que el fabricante proporciona con el fin de encontrar un perfil que sea válido para el sistema que hemos propuesto.

Las pruebas de este apartado se harán en lo que llamamos “rayo directo” y esto tiene una explicación:

El software permite obtener la distancia al eje Z con un clic de ratón sobre el pixel del que queramos la distancia al eje Z, de tal forma que, si el objeto a medir está situado en el rayo directo las coordenadas de los ejes X e Y son cero, siendo la distancia del eje Z la misma a la que está el objeto. Esto se entiende mejor observando la Figura 15, donde se representan los ejes de coordenadas en la lente del sensor, de esa forma será en la que coloquemos la cámara, correspondiendo el eje X al plano horizontal, el Y al vertical, mientras que el eje Z es el que incide perpendicularmente a ambos en el centro de la lente.

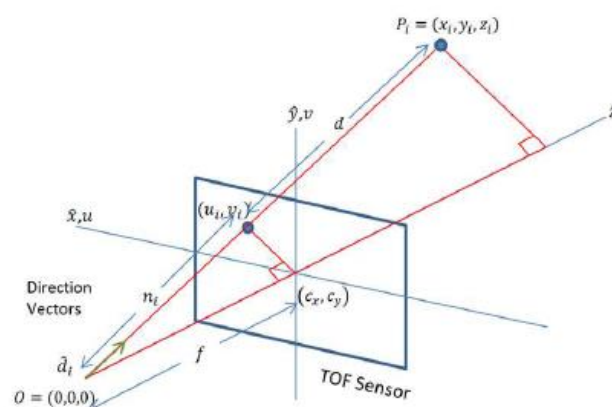


Figura 15: Ejes de coordenadas del OPT8241 [6]

El SW no proporciona información de los ejes X e Y, de tal forma que para obtener cualquier distancia que no sea en rayo directo tendremos que extraer la información del fichero PCD. Extraer la información de ese fichero es una tarea tediosa, ya que habría que buscar en que línea del fichero se encuentra el pixel del cual se quiere obtener la distancia y sobre esa información dada en coordenadas (x, y, z) realizar el módulo para obtener la distancia.

Por ello al tener varios perfiles que probar y multitud de medidas que hacer, los ensayos en rayo directo no sirven para caracterizar el perfil, pero sí para saber cuál de los perfiles es el que funciona mejor.

Para esta prueba hemos diseñado el siguiente escenario de pruebas con el fin de tener un entorno repetible y fiable, con el que poder disminuir los errores introducidos por el factor humano.

3.2.1. Escenario de pruebas en rayo directo

En la Figura 16 podemos ver el entorno de trabajo que se ha preparado para tener la certeza de que la cámara y las marcas a medir siempre estarán situadas de la misma forma, haciendo que el error introducido por el factor humano sea el mínimo posible y el siempre el mismo, en cualquier instante de tiempo.



Figura 16: Escenario de pruebas en rayo directo

Para la realización de este escenario se ha montado un rail de aluminio puesto en un plano horizontal, apoyado sobre dos soportes verticales. A ese rail le hemos añadido una cinta métrica adosada a lo largo del mismo de tal forma que nos permite medir distancias hasta los 5,4 metros, que es la longitud del rail. La cámara se coloca con un soporte fijo en un extremo, apuntando a lo largo del rail y coincidiendo con el cero de la cinta métrica.

Como objeto/marca para ir situando a lo largo del rail se ha usado una cara de cartón de dimensiones 20 x 20 cm, ya que el cartón tiene una superficie muy plana y es adecuado para realizar la pruebas. Esta marca se posicionará siempre encima del rail, con un soporte, por lo que tendremos exactamente la medida real a la que está situada si observamos la distancia en la cinta métrica.

Con este escenario podemos dar paso a las primeras medidas de distancia, donde se probarán diferentes perfiles de los que proporciona el fabricante.

3.2.2. Medidas sobre los perfiles por defecto

Al conectar la cámara, está siempre tiene que tener seleccionado un perfil de operación. En este caso hemos realizado pruebas a 3 perfiles de los que proporciona el fabricante.

Según el escenario montado, conectamos la cámara y seleccionamos con que perfil vamos a trabajar. Ahora hay que posicionar la marca a diferentes distancias (conocidas gracias a la cinta métrica) y ver qué valor de distancia proporciona la cámara.

La cámara está continuamente actualizando la información que procede del entorno variando ligeramente la distancia que tiene almacenada en cada pixel. Por ello la medida depende del instante en que capturemos la imagen, es decir, que sin cambiar el objeto de posición podemos realizar la medida de distancia que tiene un pixel obteniendo un valor, de tal forma que si volvemos a obtener el valor del mismo pixel veremos que la medida de distancia ha variado ligeramente respecto a la anterior.

Para obtener una medida fiable, es necesario realizar varias medidas, por ejemplo, en esta prueba se toman 50 muestras de cada distancia, haciendo una media aritmética del valor de ellas.

En la Tabla 4 (medidas en centímetros) mostramos el resultado obtenido después de hacer la media para cada distancia y para cada perfil del fabricante, en este caso hemos probado tres perfiles. Es decir, que cada medida de cada perfil que aparece en la tabla es una media de 50 muestras del pixel en esa medida, eliminando así posibles errores en un instante determinado.

Distancia real	LongRange	MetriculousLongRange	MetriculousShortRange
40.00	106.31	40.96	45.45
50.00	117.49	51.20	55.10
60.00	127.15	61.21	65.29
80.00	147.82	81.29	84.44
100.00	167.81	102.12	102.38
120.00	187.37	122.16	123.07
140.00	206.75	141.94	143.77
160.00	227.23	161.40	162.63
180.00	245.26	181.84	182.51
200.00	265.72	201.76	201.91
220.00	286.12	221.94	221.82
240.00	305.44	241.30	243.10
260.00	324.05	261.00	263.36
280.00	343.80	280.27	282.11
300.00	364.37	300.44	306.24
320.00	383.15	319.88	
340.00	401.85	340.35	
360.00	422.10	361.25	
380.00	441.92	379.63	
400.00	460.80	400.82	
420.00	479.67	419.57	
440.00	499.43	438.37	
460.00	517.82	457.85	
480.00	539.49	477.91	
500.00	556.82	500.04	
520.00	577.62	519.06	
540.00	595.35	538.26	
ERROR MEDIO	63.29	1.21	3.55

Tabla 4: Medidas en rayo directo sobre los perfiles por defecto

Error LongRange	Error MetriculousLongRange	Error MetriculousShortRange
66.31	0.96	5.45
67.49	1.20	5.10
67.15	1.21	5.29
67.82	1.29	4.44
67.81	2.12	2.38
67.37	2.16	3.07
66.75	1.94	3.77
67.23	1.40	2.63
65.26	1.84	2.51
65.72	1.76	1.91
66.12	1.94	1.82
65.44	1.30	3.10
64.05	1.00	3.36
63.80	0.27	2.11
64.37	0.44	6.24
63.15	0.12	
61.85	0.35	
62.10	1.25	
61.92	0.37	
60.80	0.82	
59.67	0.43	
59.43	1.63	
57.82	2.15	
59.49	2.09	
56.82	0.04	
57.62	0.94	
55.35	1.74	
MEDIA		
63.29	1.21	3.55

Tabla 5: Errores en las medidas de los perfiles por defecto en rayo directo

En la Tabla 4 vemos los 3 perfiles estudiados y la distancia de referencia medida por la cinta métrica.

En la Tabla 5 vemos el error en valor absoluto de cada medida en comparación con la distancia real. También se ha realizado una media aritmética de los errores de cada perfil, con el fin de obtener un solo valor que pueda cuantificar la precisión del perfil. En un perfil no solo importa el error que introduce, sino también el rango de distancias que permite medir. Por ello nos interesa encontrar un perfil que permita medir un rango amplio de distancias con un error mínimo.

Las medidas de distancia se obtienen haciendo clic en el pixel de la imagen del que queremos saber la distancia, por ello, el rango de medida será hasta cuando nuestro propio ojo pueda diferenciar en la imagen el objeto del cual quiere realizar la medida, de tal forma que se parará de hacer medidas cuando el objeto sea indistinguible en la imagen.

Con esta información podemos ver las tablas mostradas más arriba con más sentido. Si nos fijamos en el error que introduce cada perfil, tanto el valor medio como medida a medida vemos que el perfil llamado Long Range tiene un error muy grande, de 63,28 cm, para la aplicación que queremos desarrollar. Si observamos el rango de distancias que permiten medir, vemos que el perfil llamado Metriculous Short Range tiene una precisión de medida aceptable pero solo permite distinguir un objeto a 3 metros.

Por último, el perfil Metriculous Long Range es el perfil que menos error introduce en la medida, 1,21cm en valor medio, siendo también el que permite un rango muy bueno de medidas, permitiendo distinguir el objeto hasta 5,4 metros.

Con estas características queda claro que el perfil que se va a usar para el posterior desarrollo es el Metriculous Long Range. En el siguiente apartado usaremos este perfil como “perfil padre” y calibraremos la cámara sobre este perfil para intentar mejorar el error que introduce y el rango de medidas.

3.3. Calibración sobre el perfil elegido

En este apartado añadimos dos perfiles nuevos, de tal forma que a la hora de crear cada perfil seleccionaremos en ambos que hereden la información del perfil Metriculous Long Range. En estos dos nuevos perfiles estudiaremos como afecta la calibración que vamos a hacer en comparación con la que ya estaba.

Según el fabricante la calibración de la lente y la de fase son las 2 de más importancia, por ello serán las que estudiemos. El perfil sobre el que realizaremos la calibración de la lente lo hemos llamado “Long Lente” y al que realizamos la calibración de fase lo hemos llamado “Fase Cal”.

A continuación, se explica en detalle cómo se realizan ambas calibraciones.

3.3.1. Calibración de la lente

El objetivo principal de esta calibración es eliminar las distorsiones ópticas que introduce la lente. El funcionamiento consiste en poder transformar cada píxel de la cámara en unas coordenadas (X, Y, Z) según el modelo mostrado en la Figura 17 en el que se muestran las proyecciones de un punto del espacio sobre la lente de la cámara.

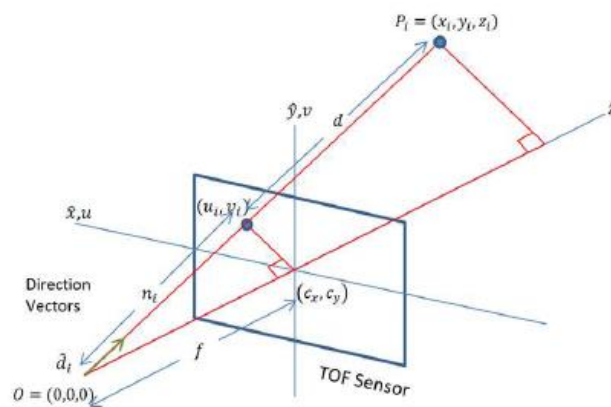


Figura 17: Ejes de coordenadas de la lente

Gracias a la calibración de la lente se pueden transformar las coordenadas distorsionadas de los píxeles en coordenadas equivalentes que se pueden utilizar bajo el modelo de cámara estenopeica (cámara sin lente).

Para calibrar la cámara se utiliza la imagen de la Figura 18 en tamaño A2. Esta imagen sirve para tomar datos de las esquinas de los cuadrados. Es conveniente realizar varias capturas y en distintos ángulos, intentando ocupar la mayor parte del rango de visión de la cámara.

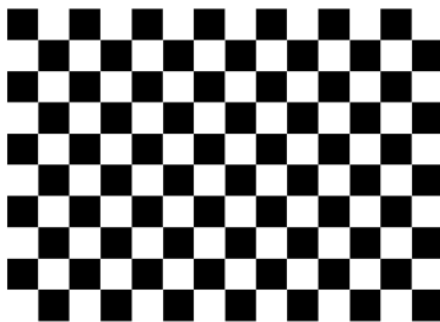


Figura 18: Imagen para la calibración de la lente [6]

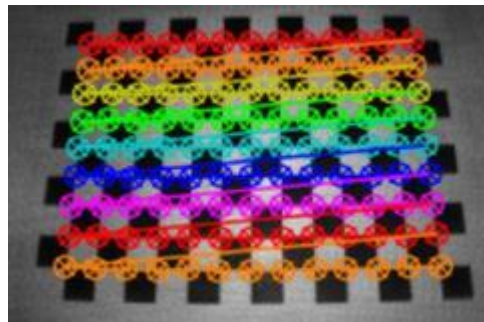


Figura 19: Comprobación de calibración de la lente [6]

Desarrollo práctico

Después de realizar una captura debemos comprobar si se ha realizado bien, para ello hacemos doble clic y deberíamos ver una imagen como Figura 19, con las siguientes diagonales de colores para verificar que ha obtenido el patrón correctamente.

Una vez se conoce el funcionamiento, es el momento de realizar esta calibración de la siguiente forma:

En el SW debemos seleccionar la pestaña Lens Calibración según se ve en la Figura 20, poner nombre al nuevo perfil, lo llamaremos “Long Lente”, y seleccionar como perfil padre Metriculous Long Range. También permite la opción de guardar este perfil en el HW (Memoria EPROM) y seleccionarlo como perfil por defecto.

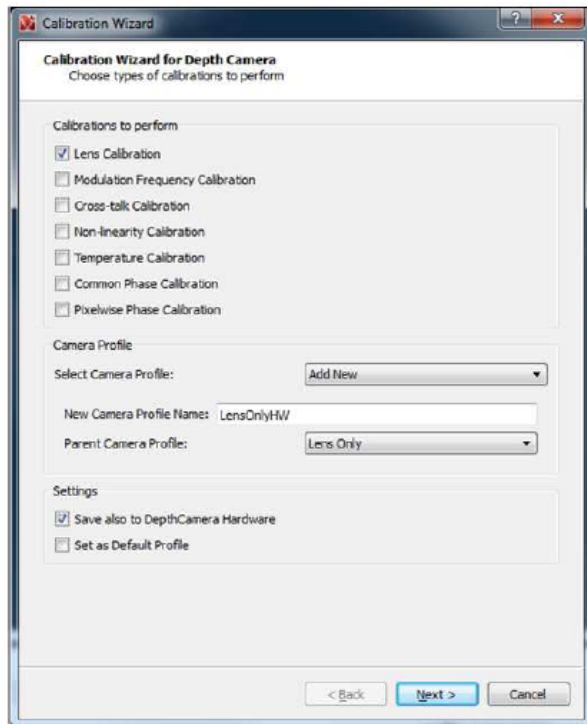


Figura 20: Ventana de selección de calibraciones [6]

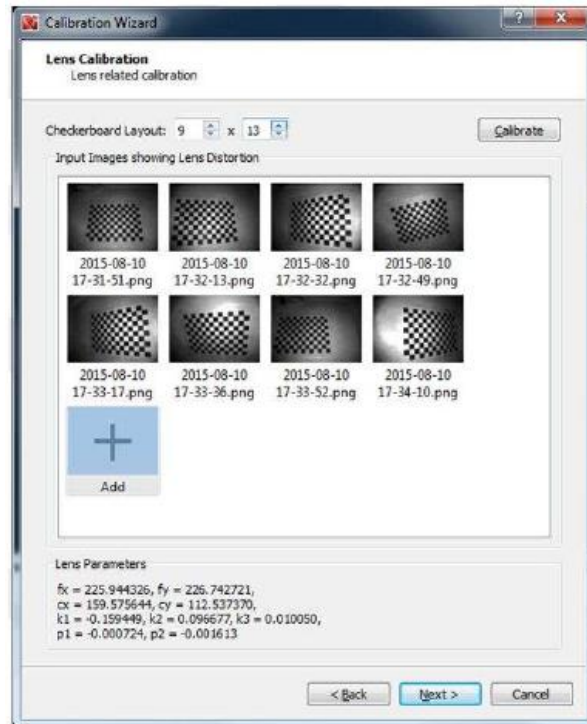


Figura 21: Ventana de calibración de la lente [6]

Una vez realizado esto, la pantalla de la Figura 21 nos permite capturar diferentes imágenes del tablero de ajedrez. Una vez hecho debemos comprobar que cada imagen ha obtenido bien los datos, para ello comprobamos si se ven las diagonales de colores.

Una vez hecho esto ya solo tenemos que seleccionar el perfil llamado “Long Lente” y realizar las mismas pruebas que en el apartado anterior para ver los efectos de la calibración.

3.3.2. Calibración de fase

De la misma forma que en la calibración del perfil anterior, en esta seleccionamos la pestaña llamada “common phase calibration” y como perfil padre Metriculous Long Range, llamando a este nuevo perfil “Fase Cal”

Esta calibración de fase consiste en enfrentar la cámara a una pared lisa de tal forma que introducimos la medida que hay en rayo directo, esto es, entre la lente de la cámara y la pared en línea recta. En la ventana de la Figura 22 tenemos que introducir dicha distancia que en nuestro caso es de 0,72 metros.

Pulsamos calibrar y ya tenemos el perfil Metriculous Long Range pero al que le hemos calibrado la fase, creando así el perfil llamado “Fase Cal”.

Hay que realizar las mismas pruebas que con los perfiles por defecto para comprobar si esta calibración mejora o empeora la precisión en la medida de distancia y el rango de medidas.

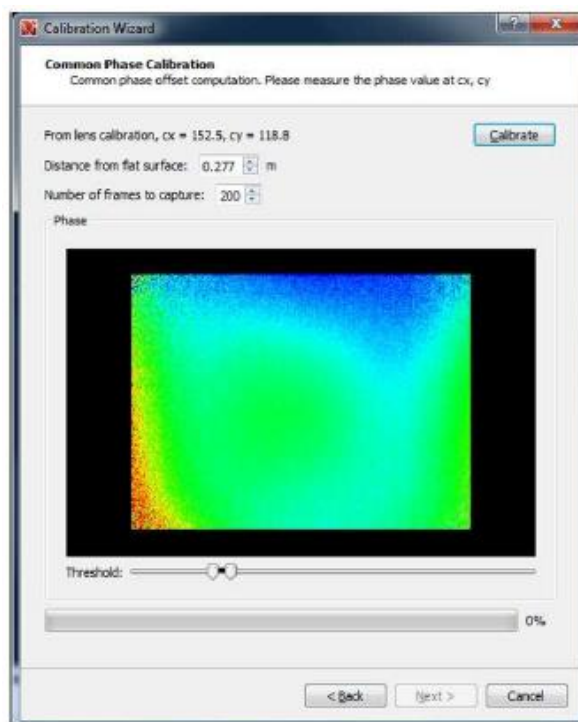


Figura 22: Ventana de calibración de la fase [6]

3.3.3. Medidas sobre los perfiles de calibración

Sobre el mismo escenario donde se realizaron las pruebas de los perfiles por defecto vamos a realizar las nuevas medidas de los dos perfiles que acabamos de calibrar para estudiar su comportamiento en cuanto a precisión y rango de medidas.

En la Tabla 6 y la Tabla 7 (medidas en centímetros) podemos ver los resultados obtenidos. Según los datos, se puede apreciar que el rango de medidas de los tres perfiles llega hasta 5,4 metros, por lo que en este ámbito no hemos mejorado nada. Donde podemos ver cambios es en la precisión de la medida, vemos que la calibración de la lente no ha mejorado el perfil Metriculous Long Range, sino que lo ha empeorado ligeramente pasando de un error medio de 1,21 a 1,44 cm. En cambio, la calibración de fase ha conseguido mejorar el error medio a un valor de 1,04 cm.

Otro aspecto a tener en cuenta es si el error en la medida aumenta en función de la distancia, para ello miramos la Tabla 7 donde se muestran los errores de cada medida. Vemos que en general los errores no dependen de la distancia a la que esté la marca a medir y todos ellos están entorno al valor medio de ± 1 centímetro.

Con estos resultados decidimos que tanto por la precisión (± 1 cm) como por la distancia máxima a la que se puede medir un objeto (5,4 m), el perfil “Fase Cal” al cual hemos calibrado la fase es potencialmente un perfil valido para el usarse en la aplicación de posicionamiento en interiores.

Por ello el siguiente apartado trabajará con este perfil, tratando de realizar nuevos escenarios de medidas, que no sean en rayo directo, para validar por completo la cámara de tiempo de vuelo y su uso como sensor de medidas de distancia para el sistema propuesto de posicionamiento en interiores.

Distancia real	FaseCal	MetriculousLongRange	LongeLente
40.00	40.30	40.96	40.40
50.00	50.26	51.20	50.55
60.00	60.26	61.21	61.37
80.00	81.66	81.29	81.11
100.00	100.36	102.12	101.35
120.00	121.06	122.16	121.91
140.00	140.68	141.94	141.41
160.00	161.10	161.40	161.46
180.00	182.08	181.84	181.74
200.00	201.83	201.76	201.12
220.00	220.61	221.94	219.80
240.00	241.63	241.30	241.17
260.00	260.69	261.00	259.73
280.00	281.06	280.27	278.30
300.00	299.92	300.44	298.28
320.00	321.04	319.88	318.69
340.00	339.96	340.35	339.42
360.00	360.00	361.25	359.38
380.00	379.80	379.63	378.83
400.00	398.74	400.82	398.57
420.00	419.21	419.57	418.20
440.00	438.68	438.37	437.95
460.00	458.18	457.85	457.69
480.00	478.18	477.91	478.55
500.00	497.79	500.04	497.55
520.00	517.44	519.06	517.45
540.00	538.41	538.26	536.21
ERROR MEDIO	1.05	1.21	1.44

Tabla 6: Medidas de los perfiles calibrados y MetriculousLongRange

Error Fase Cal	Error MetriculousLongRange	Error Long Lente
0.30	0.96	0.40
0.26	1.20	0.55
0.26	1.21	1.37
1.66	1.29	1.11
0.36	2.12	1.35
1.06	2.16	1.91
0.68	1.94	1.41
1.10	1.40	1.46
2.08	1.84	1.74
1.83	1.76	1.12
0.61	1.94	0.20
1.63	1.30	1.17
0.69	1.00	0.27
1.06	0.27	1.70
0.08	0.44	1.72
1.04	0.12	1.31
0.04	0.35	0.58
0.00	1.25	0.62
0.20	0.37	1.17
1.26	0.82	1.43
0.79	0.43	1.80
1.32	1.63	2.05
1.82	2.15	2.31
1.82	2.09	1.45
2.21	0.04	2.45
2.56	0.94	2.55
1.59	1.74	3.79
MEDIA		
1.05	1.21	1.44

Tabla 7: Errores en las medidas de los perfiles calibrados y MetriculousLongRange

3.4. Análisis completo del perfil Fase Cal

En este apartado se realizarán las pruebas que simularan el espacio de trabajo que tendrá la aplicación de posicionamiento real. En definitiva, las pruebas más importantes consisten en verificar que la precisión que se obtuvo en las pruebas de rayo directo se mantendrá cuando la marca se encuentre a diferentes ángulos respecto al rayo directo.

Estas pruebas implican que ya no se puede obtener la distancia al objeto directamente desde el software debido a que solo proporciona la distancia al eje Z, la cual en rayo directo era la misma que al objeto dado que los valores de X e Y eran cero.

Esto obliga a obtener la información de distancia del fichero PCD, el cual se ha explicado en el apartado 3.1.3. El fichero PCD da información de la distancia a los ejes X, Y, Z, y a partir de esa información se puede obtener la distancia de cada pixel haciendo el módulo del vector que generan las 3 coordenadas, es decir, con la siguiente formula:

$$distancia = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

Después de conocer la forma en la que se extrae la medida de distancia de un pixel, no es factible calcular manualmente la ubicación en el PCD del pixel del que queremos la medida y hacer el módulo de sus coordenadas. Por ello, para automatizar esta tarea se realiza un programa con Matlab (ver Anexo: Código Matlab), el cual se explica a continuación.

3.4.1. Automatización de la medida de distancia mediante Matlab

En este apartado se pretende describir el funcionamiento y las posibilidades que ofrece el programa que se ha realizado, sin entrar en detalles analizando el código, es decir, en primer lugar, se describe a nivel funcional y posteriormente se darán detalles técnicos sobre la realización de dichas funciones.

Este programa sirve para introducir las coordenadas de un pixel (x, y) de una imagen de nube de puntos y obtener la distancia al pixel introducido mediante un fichero PCD asociado a la imagen.

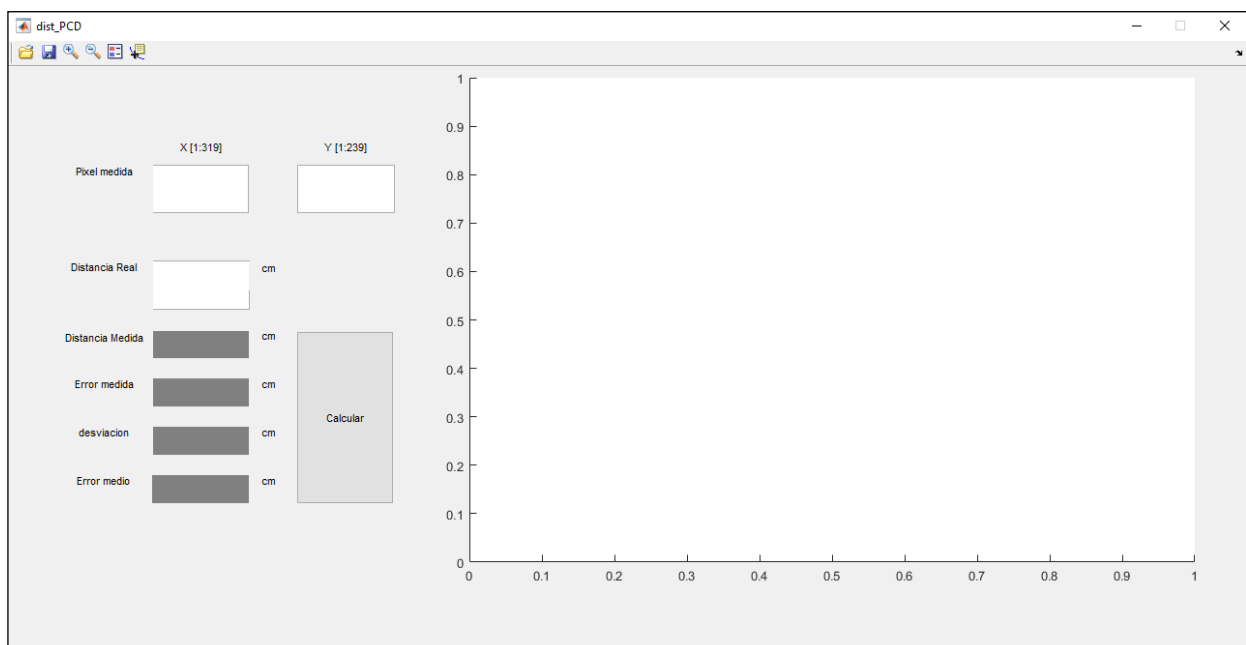


Figura 23: Interfaz gráfica de Matlab

Desarrollo práctico

En la Figura 23 vemos el diseño que se ha realizado con el comando “guide”, el cual abre la interfaz gráfica de Matlab para hacer el diseño.

Al ejecutar el script de Matlab se abrirá ventana mostrada la Figura 23, en ella tendremos que introducir el pixel del que queremos saber la distancia, el cual se obtiene directamente del software. También debemos introducir la medida real a la que se encuentra el objeto a medir para hacer uso de ella a nivel comparativo.

Con estos datos de entrada pulsamos en el botón “calcular” y obtendremos: La distancia medida por la cámara, el error en valor absoluto respecto a la medida real, la desviación típica de la medida y el error medio acumulado de todas las medidas. La forma en la que se calculan esos parámetros será descrita más adelante.

Este programa está pensado para introducir multitud de medidas de tal forma que se representa en una gráfica la medida realizada con la cámara y la medida real introducida. También se guardan los datos en un documento Excel para su posterior análisis.

Una cuestión interesante es el cálculo de la desviación típica de la medida, ya que a priori si estamos obteniendo la medida de un único pixel no tendríamos forma de realizar este cálculo, ya que la desviación típica necesita más de una medida, es decir, no puedes obtener desviación respecto a otras muestras de esa medida si solo tienes una muestra.

Este cálculo es importante de realizar, sirve para conocer la desviación que presentan los datos en su distribución respecto a la media aritmética de dicha distribución, es decir, da información sobre la concentración de medidas alrededor de la media, de tal forma que un valor bajo de desviación típica indica que todas las medidas realizadas están muy próximas a la media.

La medida de distancia no se calcula sobre un único pixel del fichero PCD, sino que se coge una ventana cuadrada de pixeles de tal forma que tendremos una ventana de 5 x 5 pixeles donde el que se introduce en el programa es el pixel central. Por ello se podrá calcular la desviación típica entre estas 25 medidas.

El hecho de coger ese tamaño de ventana tiene una justificación, la cual está relacionada con el tamaño de la marca a medir, la resolución de la cámara, el rango de medidas de distancia y los posibles errores puntuales en función del tiempo que este sensor pueda tener.

Justificación de un tamaño de marca y un tamaño de ventana concretos

El espacio en el que se pretenden realizar las pruebas intenta simular el espacio en el que trabajaría la cámara de manera real, para ello habría que montar un sistema en el que la cámara apuntara al techo y las marcas se situaran en el techo o próximas a él, pero para hacer la caracterización del sensor es más cómodo simular este escenario de la siguiente forma:

Situaremos la cámara en el rail según se describió en el apartado 3.2.1, pero añadiremos otro rail adosado perpendicularmente a 350 cm del rail inicial. A este nuevo rail se le pone una cinta métrica de tal forma que podemos conocer la distancia de ambos catetos (ambos railes) y así mediante el teorema de Pitágoras calcular la hipotenusa, que sería la distancia entre la marca y la cámara. Es decir, que un cateto se fija a 350 cm (simulando distancia al techo) y el otro es por el que se desplaza la marca.

Para una mejor comprensión del escenario, en la Figura 24 la cámara estaría situada en el vértice ‘B’ y la distancia del cateto ‘c’ es de 350 cm, mientras que el cateto ‘b’ varía en función de las pruebas, el vértice ‘C’ será en el que se sitúe la marca a medir.

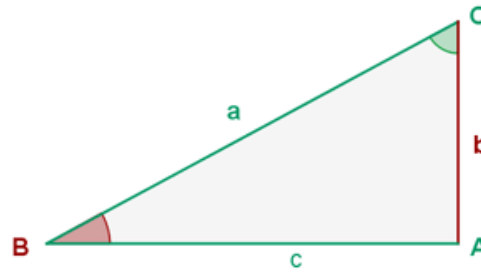


Figura 24: Triángulo rectángulo

La máxima longitud del cateto 'b' viene determinada por el ángulo de visión de la cámara, el cual es según el fabricante de 74° en horizontal por 59° en vertical. De la forma que se sitúa la cámara el ángulo máximo del vértice 'B' sería de $74/2 = 37^\circ$

$$\tan(\hat{B}) = \frac{b}{c} \rightarrow b = c * \tan(\hat{B}) = 350 * \tan(37^\circ) \approx 260 \text{ cm}$$

Por lo que la máxima distancia que podrá medir la cámara en este escenario será de:

$$\text{hipotenusa} = \sqrt{b^2 + c^2} = \sqrt{260^2 + 350^2} = 436 \text{ cm}$$

Esto implica que en este espacio de trabajo concreto la cámara medirá distancias en el rango de 350 cm a 436 cm. Este escenario se describirá mejor en un apartado posterior, aquí se ha comentado brevemente para obtener un rango de medidas que necesitaremos a la hora de elegir un tamaño de marca y de ventana de medida.

Otro aspecto importante, el cual ya se ha comentado en apartados anteriores, es que la medida que entregan los píxeles en función del tiempo no es exactamente la misma en todos los instantes por lo que sería necesario realizar varias medidas para tener una certeza mayor de la medida obtenida.

Si en lugar de obtener la distancia de un único pixel la obtenemos también de los píxeles adyacentes a él, obtendríamos más medidas del mismo objeto, pero en un único fichero PCD, lo que ahorraría tiempo y daría precisión (mayor confianza al tener más medidas y poder calcular la desviación típica entre ellas).

Ahora bien, debemos establecer un criterio de cuantos píxeles coger alrededor del pixel que queremos medir, es decir, que tamaño de la ventana elegir. Algo lógico es pensar que, si la cámara tiene una precisión aproximada de un centímetro en valor absoluto, esta cámara no podrá detectar variaciones por debajo de esa distancia, de tal forma que el criterio establecido será:

Se seleccionarán píxeles (alrededor del que queremos medir), hasta que la diferencia real de distancias entre píxeles sea 10 veces menor del error de la cámara (1cm). Esto quiere decir que si la precisión está en torno a un centímetro se seleccionan los píxeles que varían de manera real respecto al que queremos medir, menos de 0,1cm.

El cálculo del límite de la ventana en distancia se calcula de la siguiente forma: El cateto c será de 350cm y la hipotenusa de 350,1cm (diferencia de 0,1cm) de tal forma que obtendremos la distancia del cateto 'b' como distancia límite de la ventana.

Haciendo el siguiente cálculo, $b = \sqrt{h^2 - c^2} \approx 8 \text{ cm}$, vemos que nos podremos desplazar a 8 cm del pixel central de la marca que queremos medir, y obtendremos la misma medida con el sensor, ya que el error real que se introduce es de 1 mm como máximo, por ello supondremos esta diferencia de error real como nula, no teniéndola en cuenta.

Por lo tanto, conocemos la limitación de la ventana en distancia, pero queda por determinar a cuantos píxeles corresponde esta distancia, ya que la ventana de medida está programada para obtener píxeles, no se puede programar una ventana en distancia como tal.

Desarrollo práctico

En esta parte es donde la resolución de la cámara tiene gran importancia, ya que, al alejar el objeto a medir, los píxeles que ocupa ese objeto en la imagen van disminuyendo. Es decir, que a medida que nos alejamos los píxeles ocupan una mayor área. Esto significa que, si la ventana de nuestro programa es demasiado grande y la marca no tiene mucho margen respecto a la medida de distancia, puede suceder que al seleccionar la medida de esa marca a una distancia lejana (supongamos lejana 5 metros) los píxeles de los bordes de la ventana pueden haberse salido de la marca y proporcionar una medida errónea.

Teniendo todos los aspectos anteriores en cuenta, y de forma empírica, utilizaremos una superficie plana (de material cartón) de 10 x 10 centímetros situada a 5 metros de la cámara para ver cuántos píxeles ocupa en la imagen.

El cuadrado de 10 x 10 cm genera una diagonal de 14,14 cm siendo menor que los 16 centímetros que teníamos de margen calculado anteriormente (8 cm alrededor del centro).

Para ver cuántos píxeles ocupa esta marca de 10 x 10 cm observamos la Figura 25, en ella, vemos que la marca (en color verde y centrada) ocupa 5 x 5 píxeles. En esa imagen se han numerado del 1 al 5 los píxeles que la marca ocupa, formando una ventana de 5 x 5 píxeles.

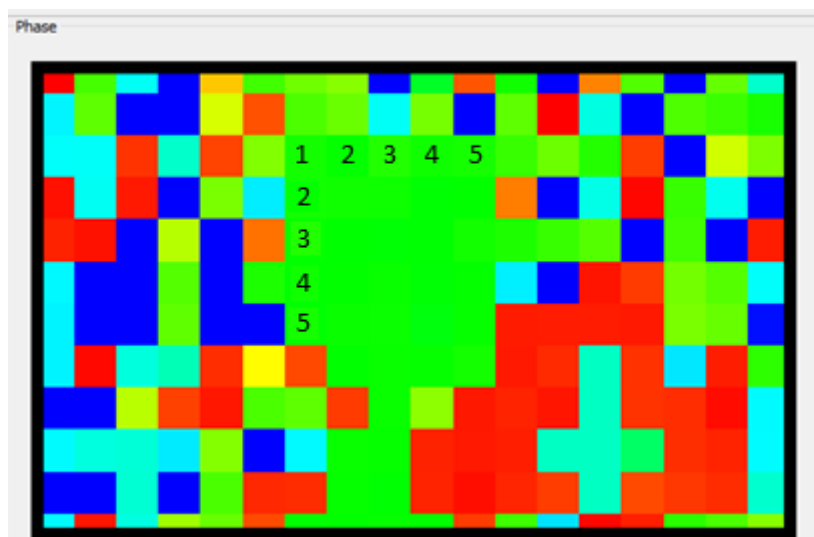


Figura 25: Cara de 10 x 10 cm a 5 metros ocupa 5 x 5 píxeles

De forma empírica, pero con los razonamientos descritos anteriormente, utilizaremos una ventana de 5 x 5 píxeles, dado que sabemos que cumple holgadamente con que la máxima diferencia de distancia sobre el objeto real entre cualquiera de esos 25 píxeles no supera 1mm.

El hecho de tener 25 píxeles de los cuales obtendremos con el programa 25 medidas de distancia, de las cuales la medida entregada es la media aritmética de todas, da una cierta seguridad de la medida realizada sobre un mismo fichero PCD. De lo contrario si obtenemos la medida de un único píxel, tendríamos que guardar 25 ficheros PCD distintos para hacer la media de las 25 medidas que otorgará el píxel a medir sobre cada uno de esos 25 ficheros.

El sistema propuesto es adecuado para tomar medidas rápidamente con una gran confianza en la medida sin necesidad de tener que extraer numerosos ficheros PCD.

Otro aspecto a tener en cuenta es el tamaño de la marca, es importante que esta ocupe más píxeles de los que ocupa la ventana en el rango de distancias de trabajo. Por lo que si a 5 metros, que es la distancia más restrictiva, la ventana de 5 x 5 píxeles ocupa un tamaño de 10 x 10 cm una posible marca podría ser una superficie plana de 20 x 20 cm de tal forma que tendríamos un borde de 5 cm de margen alrededor de la ventana de medida, lo cual asegura que no se producirán errores si el píxel seleccionado como píxel a medir no es exactamente el central.

Desarrollo práctico

A modo de resumen, a partir de ahora trabajaremos con una ventana de medida de 5 x 5 píxeles y una marca que tiene una superficie de 20 x 20 cm.

Este programa es con el que realizaremos todas las medidas de distancia, ahora se puede caracterizar al completo el perfil “Fase Cal”, al cual haremos pruebas tanto angulares como en rayo directo, y ambas en función del tiempo, esto quiere decir que obtendremos varios ficheros PCD de la misma medida, de tal forma que con cada PCD del que hagamos la medida estaremos sumando en realidad en 25 el número de muestras de esa medida.

3.4.2. Descripción del entorno de pruebas

Como se anticipó en el apartado anterior, se añadirá un rail perpendicular al rail de 5,4 metros que había inicialmente. Este se podrá colocar a cualquier distancia y fijar con una escuadra que lleva adosada (para garantizar el ángulo recto). En este caso hemos decidido fijarlo a 350 cm, ya que así simulamos la distancia que hay entre el suelo y el techo del laboratorio donde estamos realizando las pruebas. Este escenario es el que se muestra en la Figura 26.



Figura 26: Entorno final de pruebas con 2 railes formando un ángulo recto a 350 cm

Este escenario con dos railes en ángulo recto permite conocer la distancia real entre la marca y la cámara, para ello, tenemos las distancias de ambos railes como catetos del triángulo rectángulo que se forma, como el descrito en la Figura 24.

La sujeción de la cámara y las marcas se hace mediante unos soportes verticales los cuales se encajan y quedan fijados en el rail. De esta manera estamos reduciendo el error que introduce el factor humano, ya que de esta forma las marcas y la cámara se sitúan siempre de la misma manera haciendo que el error debido a la colocación de estos elementos sea siempre constante.

3.4.3. Medidas angulares

Esta es la primera prueba que se hace, en ella se desplaza angularmente la marca anteriormente descrita (superficie plana de 20 x 20 cm) por el nuevo rail adosado perpendicularmente a 350 cm, de tal forma que un cateto del triángulo rectángulo que se forma está siempre fijo a 350 cm y el otro se modifica en función de la posición de la marca.

Para la realización de cada medida con el programa desarrollado tendremos que realizar los siguientes pasos:

1. Situar la marca a medir y calcular la distancia real que tiene con la cámara.
2. Mediante el software pinchar en el pixel central de la marca para obtener sus coordenadas (x, y) en la imagen de nube de puntos.
3. Guardar un fichero PCD de la escena.
4. Ejecutar dicho programa introduciendo el pixel sobre el que queremos la medida y la distancia real a la que se encuentra el objeto a medir.
5. Desde el programa seleccionar el fichero PCD del cual queremos obtener las medidas.
6. Este proceso se repite las veces que se quiera para realizar múltiples medidas, de tal forma que al cerrar el programa se guarda automáticamente una gráfica y una tabla de Excel con los resultados obtenidos.

En la primera prueba hemos realizado los pasos anteriormente descritos modificando la posición de la marca desde el rayo directo hasta el máximo ángulo de visión de la cámara.

Para el cálculo de la distancia real, la cual aumenta en 20cm con cada medida, se ha usado la Tabla de Excel para realizar un cálculo rápido del teorema de Pitágoras.

En la Tabla y la Figura 27 vemos los resultados que ha generado el programa.

CATETOS A	CATETOS B	HIPOTENUSA
350	0	350
350	20	350.5709629
350	40	352.2782991
350	60	355.1056181
350	80	359.0264614
350	100	364.0054945
350	120	370
350	140	376.9615365
350	160	384.8376281
350	180	393.5733731
350	200	403.1128874
350	220	413.4005322

Tabla 8: Tabla para el cálculo del teorema de Pitágoras

Medida sensor	Medida real	Error	desviación
350.49	350.00	0.49	1.87
348.98	350.57	1.59	4.16
353.04	352.28	0.76	3.54
353.80	355.11	1.31	4.60
359.16	359.03	0.13	4.92
363.07	364.01	0.94	5.82
366.10	370.00	3.90	4.95
375.52	376.96	1.44	3.95
384.25	384.84	0.59	6.55
389.07	393.57	4.51	6.60
401.94	403.11	1.17	9.23
410.34	413.40	3.06	5.37
Error y desviación medios		1.66	5.13

Tabla 9: Medidas en cruceta aumentando 20cm progresivamente

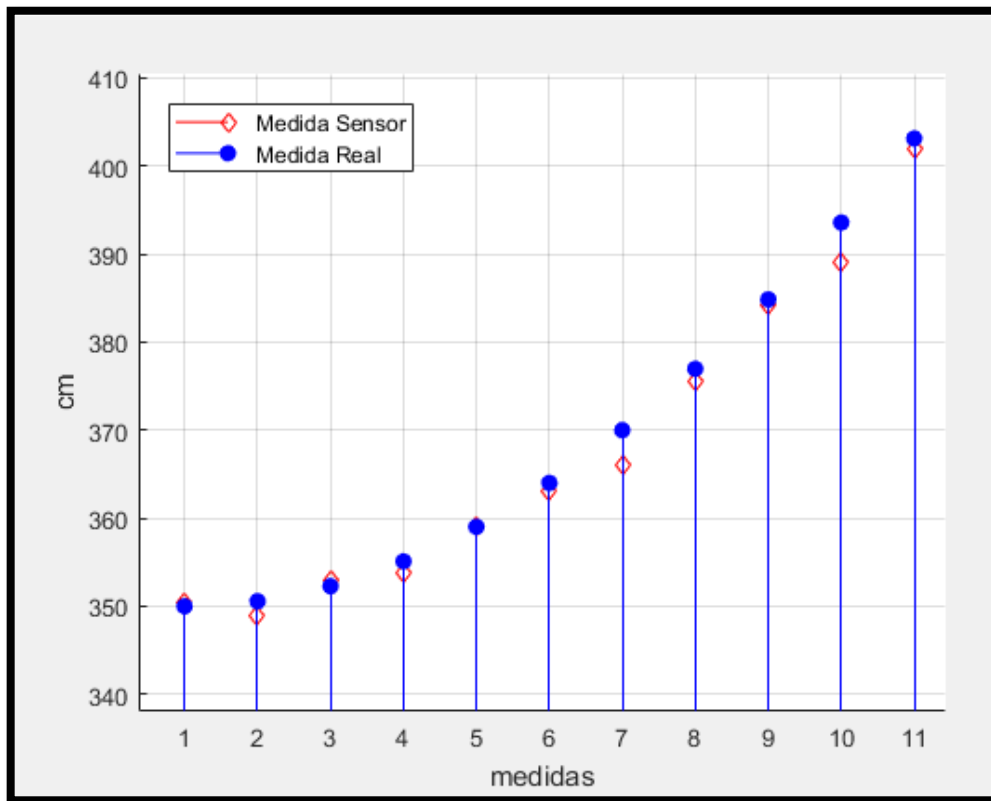


Figura 27: Medidas en cruceta aumentando 20cm progresivamente

No es correcto extraer conclusiones generales de una única prueba por lo que los comentarios serán referidos a cada prueba en particular. Cuando tengamos los comentarios de cada prueba se podrá extraer conclusiones generales respecto a la precisión de este sensor con este perfil de calibración.

En esta prueba obtenemos un error medio de 1,66 cm y una desviación típica de 5,13 cm.

También se puede apreciar en la última medida la mayor distancia a la que se puede situar la marca, siendo esta de unos 220cm (distancia del cateto) aproximadamente.

Teóricamente la cámara puede medir hasta 260cm gracias al ángulo de 37° pero hemos comprobado que este valor proporcionado por el fabricante no se ajusta a la realidad, siendo el ángulo de visión horizontal de la cámara al siguiente:

$$\tan(\hat{B}) = \frac{b}{c} \rightarrow \hat{B} = \arctg\left(\frac{b}{c}\right) = \arctg\left(\frac{220}{350}\right) = 32,15^\circ$$

Esto no quiere decir que la información del fabricante sea errónea, sino que él hace referencia a un solo pixel y nosotros estamos hablando de la distancia o ángulo a la que podemos situar la marca para que esta sea reconocida visualmente. Es lógico que esta no pueda estar en el extremo de la imagen.

3.4.4. Estudio de la dispersión de las medidas angulares

Este análisis busca realizar un número mayor de medidas para obtener una mayor confianza en las mismas. Cada vez que el programa realizado con Matlab otorga una medida de un fichero PCD en realidad el valor entregado es una media de 25 medidas muy próximas entre sí, de tal forma que el error real introducido se puede considerar nulo.

En esta prueba se cogerán 10 ficheros PCD de cada medida de distancia, de tal forma que tendremos en total 250 muestras de cada medida.

Desarrollo práctico

En esta prueba se mantiene la cruceta puesta perpendicularmente a 350cm, de tal forma que un cateto será siempre de este valor, mientras que el otro tendrá los siguientes valores: 0cm, 80cm, 140cm y 220cm. La distancia real entre la marca y la cámara para cada valor es de 350cm, 359,03cm, 376,96cm y 413,40cm respectivamente.

En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos (en cm) de las pruebas. Cada tabla se corresponde con una distancia distinta, y dentro de cada tabla se da la medida que entrega el programa de Matlab para cada uno de los 10 ficheros PCD. La columna llamada “Error” se calcula como la diferencia en valor absoluto de cada una de las 10 medidas, por lo que es el error que tiene cada una de las 10 medidas. De estos 10 errores se calcula la media de tal forma que ese valor indica el error (en media) que tendríamos al realizar una medida únicamente con un solo fichero PCD. Al igual que hemos tratado al error de cada medida lo haremos con la desviación típica de cada una de las 10 medidas.

Otro calculo realmente interesante es el error que tiene la medida final, es decir, la medida calculada como la media de las 10 medidas realizadas sobre los 10 ficheros PCD, de los que el programa extrae 25 medidas de cada uno. Esta medida es entonces el resultado de la media de 250 muestras. Con esta medida final y la distancia real, calculamos el error final que tendría el sistema.

Medidas de 10 ficheros PCD con cateto a 0 cm			
Medida sensor	Medida real	Error	desviación
349.63	350.00	0.37	3.06
350.17	350.00	0.17	2.89
350.94	350.00	0.94	2.32
350.65	350.00	0.65	2.17
348.86	350.00	1.14	2.79
349.53	350.00	0.47	2.61
350.88	350.00	0.88	3.29
349.23	350.00	0.77	2.76
350.68	350.00	0.68	2.86
349.19	350.00	0.81	3.14
MEDIA			
349.98	350.00	0.69	2.79
Error medida final			
0.02			

Medidas de 10 ficheros PCD con cateto a 80 cm			
Medida sensor	Medida real	Error	desviación
359.04	359.03	0.01	6.30
359.28	359.03	0.26	4.76
358.93	359.03	0.10	4.22
358.53	359.03	0.50	5.07
359.19	359.03	0.17	4.05
358.92	359.03	0.11	4.35
356.98	359.03	2.05	3.49
358.12	359.03	0.91	4.22
359.01	359.03	0.02	4.17
359.01	359.03	0.02	4.17
MEDIA			
358.70	359.03	0.41	4.48
Error medida final			
0.32			

Medidas de 10 ficheros PCD con cateto a 140 cm			
Medida sensor	Medida real	Error	desviación
374.75	376.96	2.21	6.89
373.39	376.96	3.57	5.84
375.66	376.96	1.30	5.12
376.92	376.96	0.04	6.64
375.76	376.96	1.21	4.94
377.76	376.96	0.79	5.43
378.29	376.96	1.33	6.89
375.07	376.96	1.89	5.88
377.89	376.96	0.93	6.23
377.89	376.96	0.93	6.06
MEDIA			
376.34	376.96	1.42	5.99
Error medida final			
0.62			

Medidas de 10 ficheros PCD con cateto a 220 cm			
Medida sensor	Medida real	Error	desviación
406.04	413.40	7.36	6.45
412.61	413.40	0.79	8.01
410.68	413.40	2.72	8.41
408.35	413.40	5.05	7.85
411.29	413.40	2.11	8.32
411.69	413.40	1.71	7.90
409.46	413.40	3.94	5.91
423.10	413.40	9.70	70.45
408.66	413.40	4.74	7.19
410.06	413.40	3.34	9.17
MEDIA			
411.19	413.40	4.15	13.97
Error medida final			
2.21			

Tabla 8: Medidas angulares en función del tiempo

Desarrollo práctico

En la Figura 28 se muestran las gráficas asociadas a las medidas realizadas en las tablas anteriores, ordenadas respectivamente.

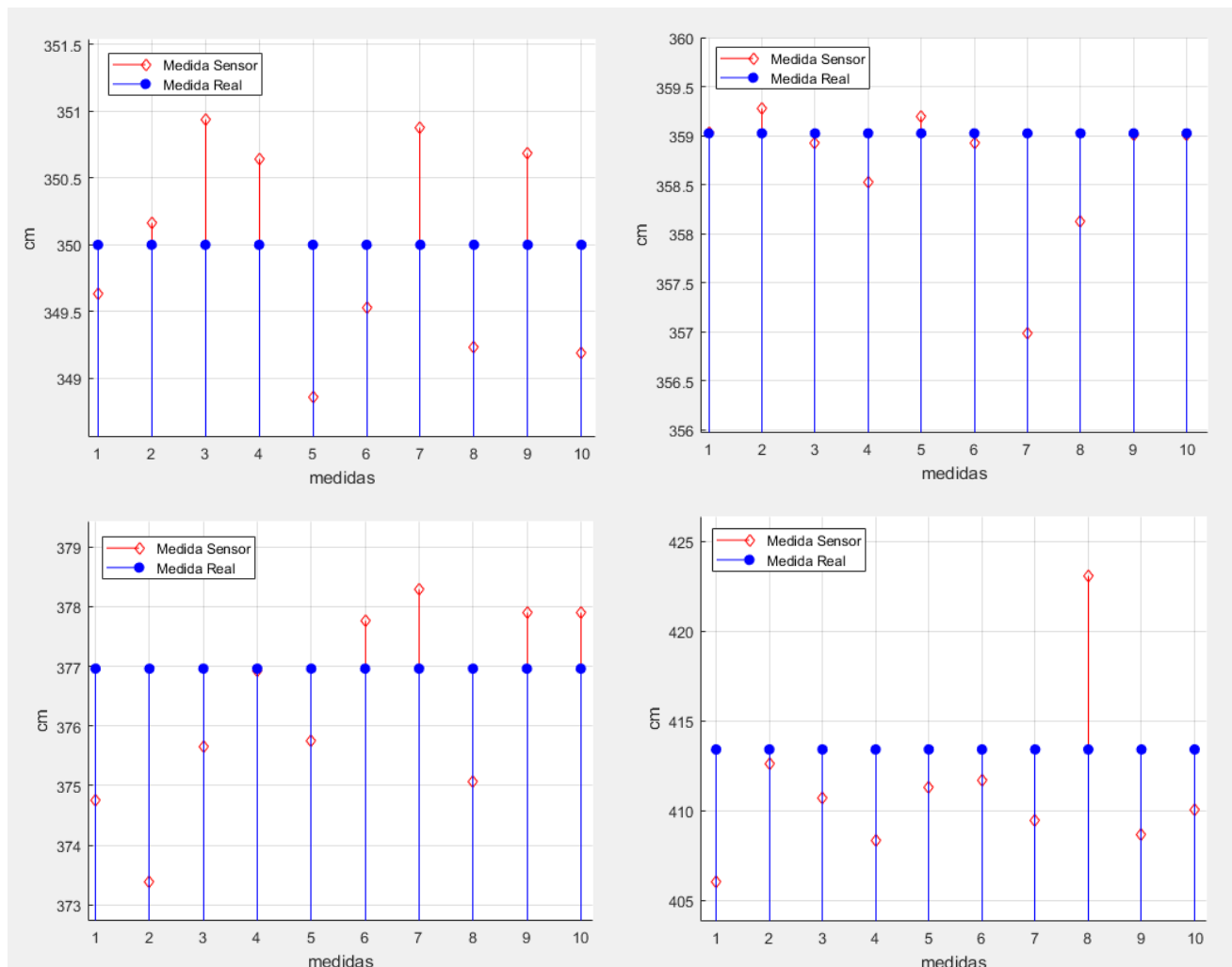


Figura 28: Gráficas de medidas angulares en el tiempo, ordenadas respectivamente con la Tabla 10

En la Figura 28 se observa que cada medida realizada sobre un fichero PCD es aleatoria, es decir, que el error no sigue un patrón fijo y puede tener picos grandes de error, tanto por exceso como por defecto.

Si ahora observamos con más detalle la Tabla 8 vemos que los errores que se introducen en el total de 10 medidas son compensados entre sí, es decir, que los errores están tanto por exceso como por defecto haciendo que si se toman varias medidas se reduzca el error haciendo la media. Por ello un mecanismo preciso y seguro es realizar la medida respecto a 10 ficheros PCD, ya que si solo se realiza de un único fichero es factible que el error cometido sea mayor respecto al método de 10 medidas.

Si nos fijamos en la casilla “Error medida final” vemos que el error de realizar el cálculo de la distancia de esta manera es menor en comparación casi con cualquier medida aislada de un solo fichero PCD.

Otro aspecto relevante que se puede observar es la pérdida de precisión y el aumento de la desviación típica a medida que aumentamos el ángulo de la marca respecto al rayo directo. Esto puede deberse a pequeñas distorsiones que introduzca la lente y a que la onda infrarroja incidente en un objeto del entorno se refleja peor cuando el objeto no está situado en el rayo directo.

En la Tabla 9 y la Figura 29 se muestra un resumen general de las pruebas realizadas. En la gráfica se aprecia muy bien que tenemos una desviación típica elevada y un error medio (calculado en valor absoluto) más grande en comparación con el error final que tiene la medida.

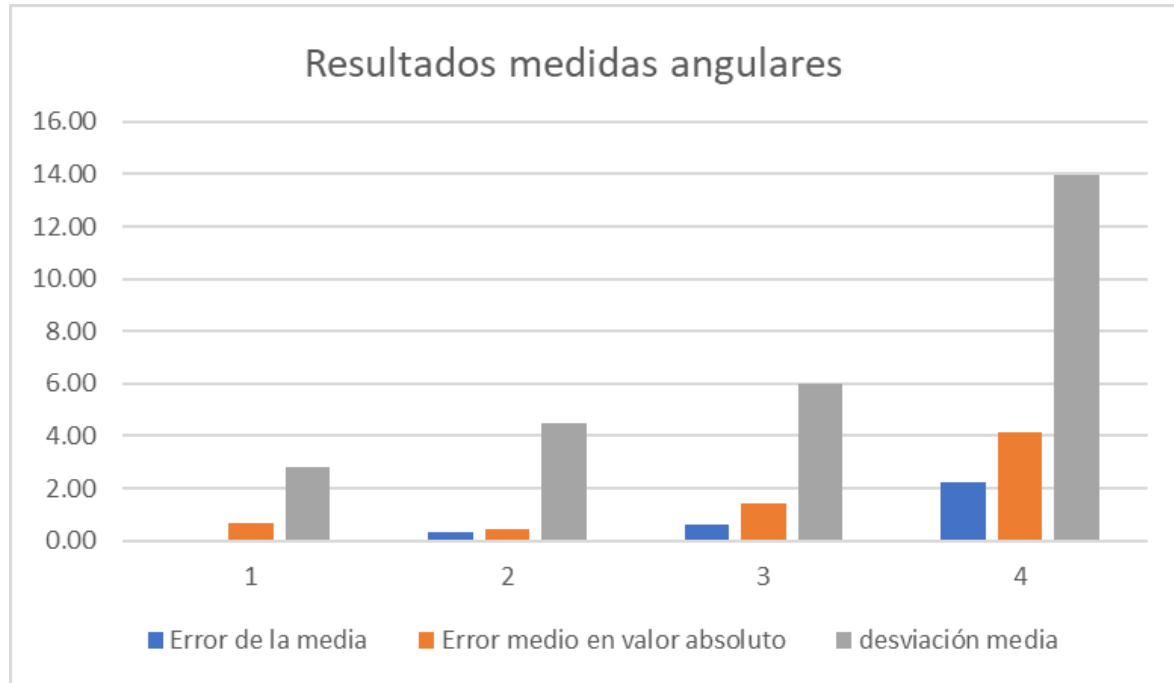


Figura 29: Grafico de resultados en las medidas angulares en función del tiempo

Media de 250 medidas del sensor	Medida real	Error de la media	Error medio en valor absoluto	desviación media
349.98	350.00	0.02	0.69	2.79
358.70	359.03	0.32	0.41	4.48
376.34	376.96	0.62	1.42	5.99
411.19	413.40	2.21	4.15	13.97
MEDIA		0.79	1.67	6.81

Tabla 9: Resumen medias angulares en función del tiempo

Las pruebas realizadas han demostrado la importancia que tiene tomar numerosas muestras de cada medida de distancia, desde este punto en adelante se obtendrán para dar por válida una medida un mínimo 10 ficheros PCD, lo que equivale a 250 muestras de la medida de distancia.

En un futuro cuando se realice la aplicación en tiempo real, habrá que decidir cuantas muestras tomar de cada medida, en este proyecto hemos tomado 250, pero en un programa que trabaje en tiempo real este parámetro se puede modificar para tomar más muestras, lo que proporciona una mayor confianza en la medida final obtenida como media de esas muestras. Esto es algo que se deberá estudiar al realizar dicho programa, ya que también es importante el tiempo empleado en la obtención y el procesado de estos ficheros. Esto requerirá una solución de compromiso entre el número de muestras a tomar y la velocidad en la que el programa entregue una medida de distancia.

A modo de conclusión de este apartado, podemos decir que, este sensor tiene una precisión en la medida (calculada con 250 muestras) de aproximadamente ± 8 mm con una desviación típica de 6,8 cm.

3.4.5. Estudio de la dispersión de las medidas en rayo directo

En este apartado se repiten las pruebas en rayo directo, ya que la anterior vez que se hizo esta prueba no se estaba obteniendo la medida mediante el programa de Matlab y el fichero PCD, por lo que no se tuvo en cuenta el factor temporal, es decir, coger numerosas muestras de la medida en diferentes instantes, ya que la medida de distancia que entrega cada pixel varía en el tiempo.

En esta prueba se realizarán medidas a 1, 2, 3, 4 y 5 metros de distancia. Cada medida se obtendrá como resultado de 250 muestras (10 ficheros PCD) al igual que en el apartado anterior.

En la Figura 31 se muestran las medidas obtenidas de cada uno de los 10 ficheros PCD para cada una de las 5 distancias.

El resumen de estos resultados se puede ver en la Tabla 10. En este caso el error calculado en valor absoluto y el error calculado como la diferencia entre la medida real y la media de 250 muestras es prácticamente el mismo en todos los casos. Esto quiere decir que las 10 medidas de los ficheros PCD han salido por exceso o por defecto, de tal forma que no se compensa el error haciendo la media.

Aun así, se puede decir que esta cámara en rayo directo tiene una precisión aproximada de 1 cm con una desviación típica de 2,6 cm. En comparación a los valores obtenidos en las pruebas angulares del apartado anterior se puede decir que en ambos casos se tiene un error similar, que aumenta ligeramente con el incremento del ángulo o de la distancia. En cuanto a la desviación típica, esta es siempre mejor cuanto menor es el ángulo.

Media de 250 medidas del sensor	Medida real	Error de la media	Error medio en valor absoluto	Desviación media
100.32	100.00	-0.32	0.32	1.12
199.71	200.00	0.29	0.33	1.28
298.52	300.00	1.48	1.48	1.98
398.94	400.00	1.06	1.07	3.44
497.60	500.00	2.40	2.40	5.23
MEDIA		0.98	1.12	2.61

Tabla 10: Resumen medidas de distancia en rayo directo

En la Figura 30 (en cm) se representan los dos parámetros que definen la calidad de las medidas. De ellos se saca la conclusión de que tanto el error como la desviación típica incrementan cuando la medida de distancia aumenta.

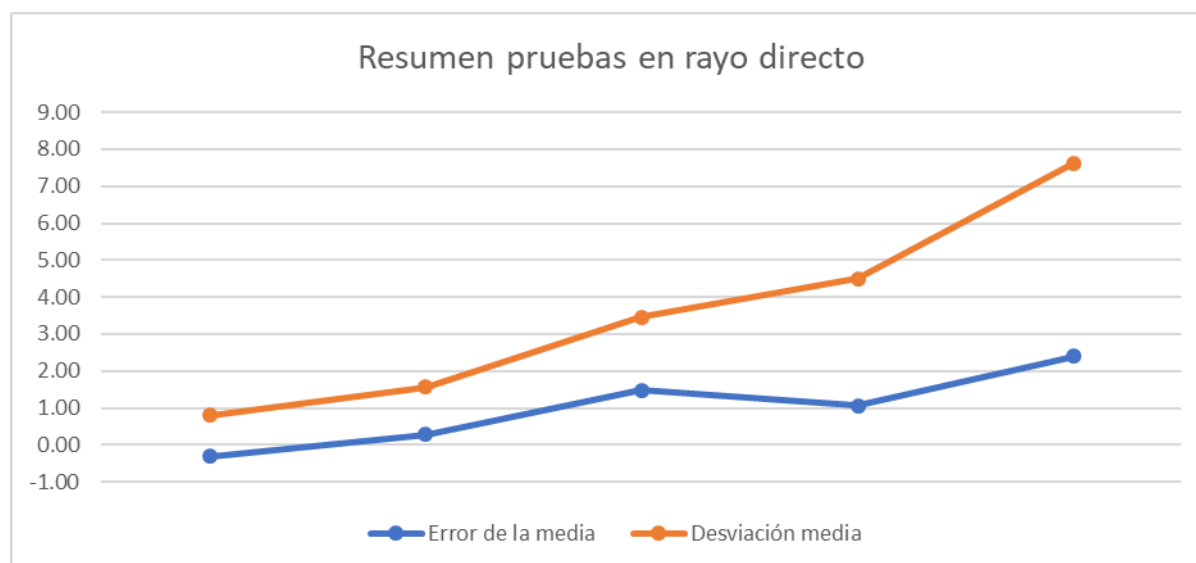


Figura 30: Error en las medidas y desviación típica

Desarrollo práctico

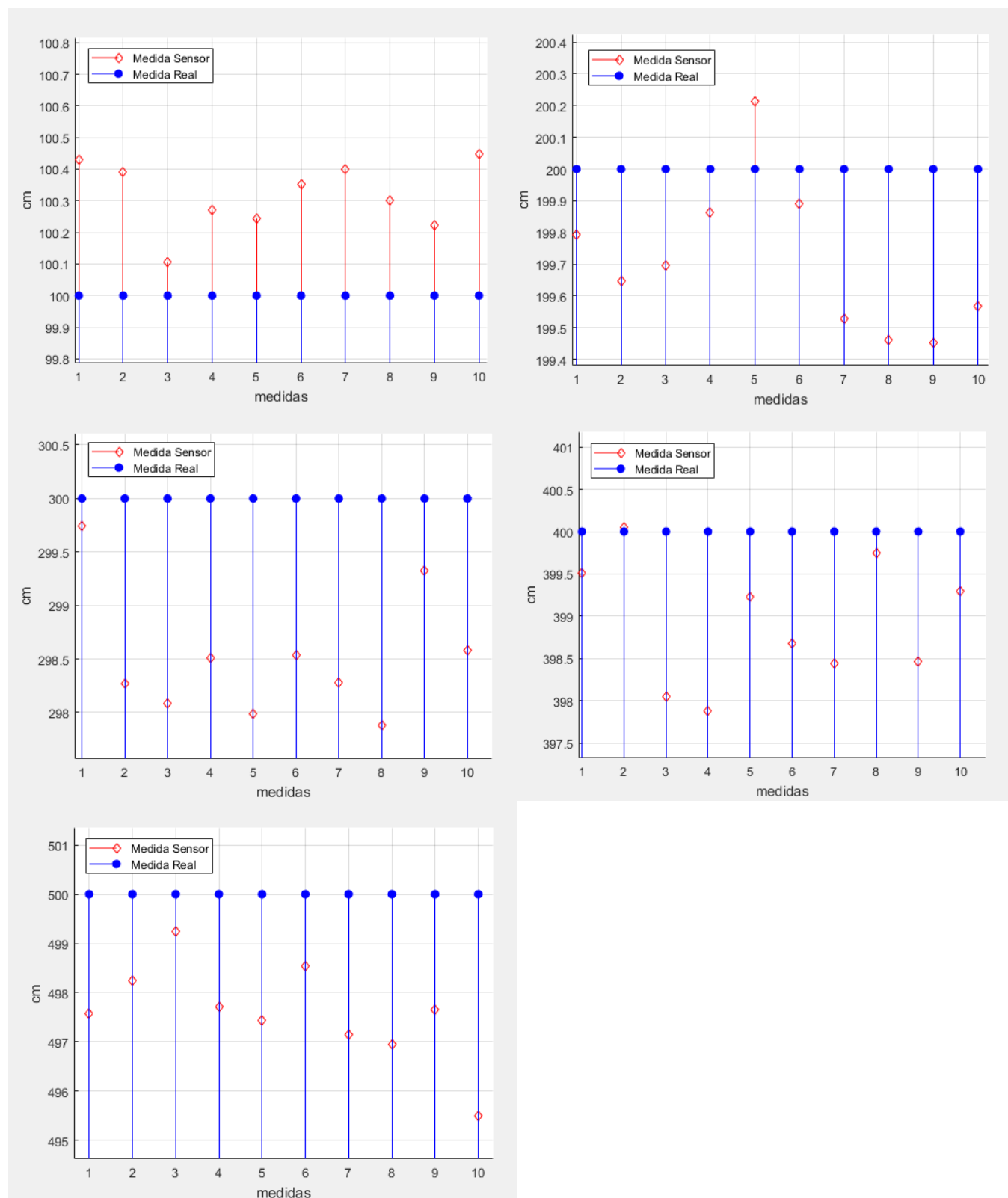


Figura 31: Graficas de Matlab sobre las medidas en rayo directo

3.4.6. Otras pruebas

En este apartado se describen 2 pruebas que se han realizado, una es probar el ángulo vertical de la cámara, ya que según el escenario de trabajo siempre se ha trabajado con ángulo horizontal. Y la otra es medir el rango de no ambigüedad que tiene la cámara con este perfil, este rango es en el que la cámara proporciona una medida de distancia válida.

Medida en máximo ángulo vertical

Para realizar esta prueba se mantiene el mismo escenario de trabajo que teníamos, es decir, 2 railes formando un ángulo recto a 350 cm como se describió en el apartado 523.4.2. Pero en este caso la cámara se rota 90 grados de tal forma que estamos usando el ángulo vertical de la cámara para realizar la medida a la marca.

La marca se sitúa en el máximo ángulo posible, dando una distancia entre marca y cámara (medida con un teodolito) de 400 cm. Con esos datos podemos determinar el ángulo vertical máximo al que se puede posicionar la marca respecto de la cámara:

$$\cos(\hat{B}) = \frac{c}{a} \rightarrow \hat{B} = \arccos\left(\frac{c}{a}\right) = \arccos\left(\frac{350}{400}\right) \approx 28,95^\circ$$

El cálculo se corresponde a la mitad del ángulo total, por lo que el ángulo de posicionamiento de la marca en la zona vertical de la cámara tiene un rango angular de $57,9^\circ$, este valor es cercano al valor teórico que proporciona el fabricante, que es de 59° .

En la Tabla 11 y la Figura 32 vemos los resultados obtenidos tras tomar 250 muestras mediante 10 ficheros PCD, cuando la cámara está situada en el máximo ángulo vertical.

Mdedida sensor	Medida real	Error	desviación
398.58	400.00	1.42	4.94132203
399.55	400.00	0.45	7.51169479
397.61	400.00	2.39	5.79294445
398.40	400.00	1.60	5.070113
397.49	400.00	2.51	6.06924565
397.80	400.00	2.20	7.57233859
395.58	400.00	4.42	4.59030429
397.53	400.00	2.47	6.24832606
397.48	400.00	2.52	6.80100885
397.38	400.00	2.62	7.60856996
MEDIA			
397.74	400.00	2.26	6.22
Error medida final			
2.26			

Tabla 11: Medidas en máximo ángulo vertical

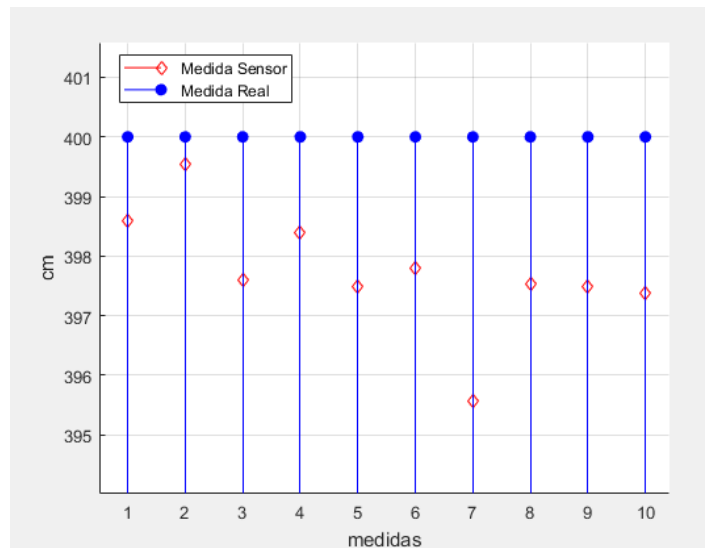


Figura 32: Grafica de Matlab de medidas en máximo ángulo vertical

El fin de esta prueba es verificar que se comporta con precisiones similares independientemente del eje en el que se encuentre la marca.

En este caso obtenemos un error de 2,26 cm y una desviación típica de 6,22 cm, estos valores son similares a los obtenidos en la prueba que se realizó con el máximo ángulo en horizontal, de la cual se obtuvo un error de 2,21 cm y una desviación típica un poco mayor en comparación, de 13,97 cm.

Rango de no ambigüedad

Esta prueba consiste en observar hasta qué distancia se puede medir con este perfil, es decir, que al tener una cámara cuya medida de distancia se hace en función de la diferencia de fase entre la señal de infrarrojos emitida y la recibida, llegará un momento en que se si la distancia aumenta, la fase de una vuelta completa cambiando de múltiplo y comenzado de nuevo el rango de medidas.

Para ver en qué medida de distancia sucede esto, colocaremos la cámara frente a una pared y la alejaremos de tal forma que la distancia comenzará a aumentar, llegará un punto en que la medida de distancia entregada por la cámara se reinicia, empezando a proporcionar nuevas medidas desde cero.

En esta prueba hemos determinado que el rango de no ambigüedad del perfil “Fase Cal” es de 7 metros. Esta distancia es aceptable para la aplicación que se pretende desarrollar.

De todas formas, se puede modificar este valor si se reduce la frecuencia de modulación de la cámara, pero esto implica una pérdida en la precisión de la medida.

Por lo tanto, el perfil de calibración “Fase Cal” es una solución de compromiso entre el rango de medida sin ambigüedad y la precisión de la medida, de tal forma que, debido a las dimensiones del escenario de trabajo real se puede afirmar que, la cámara mide de manera precisa en un rango en el que sería imposible entrar en el rango de ambigüedad.

3.5. Conclusiones

En este apartado se extraen las conclusiones fundamentales de las pruebas realizadas en el desarrollo práctico. Estas conclusiones se exponen en orden con las fases de trabajo descritas en la introducción del capítulo.

- En la primera fase se realizó un análisis general del módulo de evaluación OPT8241. En dicho análisis se explicaron las características más relevantes de este sensor, estas son: La resolución de la cámara, el ángulo de visión, los perfiles de calibración que proporciona el fabricante y el fichero Point Cloud Data del cual se extrae la información de la nube de puntos de una manera ordenada, lo que hace que se pueda potenciar este sensor a la hora de obtener medidas de distancia.
- En la segunda fase se realizan pruebas en rayo directo sobre los perfiles proporcionados por el fabricante, con el fin de observar de forma general cual se comporta mejor. El resultado de esta prueba da lugar a usar el perfil llamado “Metriculous Long Range”, ya que ha sido el que más precisión ($\pm 1,21$ cm) y mayor rango de distancia (hasta 5,4 m) tiene respecto a los demás.
- En esta fase se explora en la calibración de este sensor con el fin de intentar mejorar la precisión y el rango de medidas. En este apartado se consiguió mejorar el perfil anterior realizando la calibración de fase, por lo que el perfil de trabajo a usar ahora se llama “Fase Cal”, y tiene una precisión de $\pm 1,04$ cm y un rango de medidas de hasta 5,4 metros.
- En la cuarta fase es donde se realiza la caracterización completa de este sensor en lo que sería el escenario real de trabajo. Dicho escenario simula la distancia entre la cámara y el techo (aproximadamente de 350 cm), manteniendo esa distancia fija, y moviendo la marca por todo el ángulo de visión de la cámara. Para la realización de este apartado hemos realizado un programa con la interfaz gráfica de Matlab para la automatización de la obtención de medidas de los ficheros PCD. Una vez realizadas las pruebas, se determina que el OPT8241 es válido para el rango de medidas que el entorno de posicionamiento en interiores tiene. Este sensor con el perfil llamado “Fase Cal” ha obtenido una precisión en todo su ángulo de 8 mm de media con una desviación típica de 6,8 cm.

4. Aplicación a trilateración

Este proyecto ha consistido en la validación del OPT8241 como sensor de medida de distancia, el cual resulta valido si tomamos un mínimo de muestras de la medida, es decir, que si se da una medida como resultado de tomar pocas muestras, esta puede tener poca precisión. El siguiente paso (en este proyecto no se realiza) sería investigar en detección de marcas para la realización de la aplicación de posicionamiento en tiempo real, lo cual será un proyecto posterior que se deja planteado en el capítulo 5 sobre líneas futuras.

En el apartado 2.3. (Sistema de localización propuesto), se describió idealmente la aplicación de posicionamiento a la que se pretende llegar. En este capítulo se realiza una demostración de lo que sería el funcionamiento del sistema, con el fin de validar el sensor para su aplicación a un sistema de localización por trilateración esférica, con la diferencia de que en este punto del proyecto no tenemos un algoritmo de detección de marcas, por lo que la detección del pixel en el que se encuentra cada marca se hace manualmente mediante el software de la misma forma que se hizo en las pruebas de validación.

Aunque esta simulación se ha realizado en un plano horizontal, hay que extrapolarlo a la aplicación final, de tal forma que la cámara está situada en el suelo y las marcas colocadas a poca distancia del techo según se muestra en la Figura 34. Por simplicidad se ha hecho una representación en dos dimensiones, pero hay que tener en cuenta que en realidad se está trabajando en 3D.

Antes de comenzar a obtener medidas de distancia es importante saber dónde hay que colocar las marcas y las dimensiones del espacio de posicionamiento. En el capítulo anterior se determinó que debido al ángulo vertical de la cámara tenemos un límite para posicionar la marca, ya que esta debe estar dentro del ángulo de visión de la cámara. En esta sección hemos denominado celda de posicionamiento al espacio mínimo que ocupan las balizas (marcas) de posicionamiento, es decir, es el espacio desde el que la cámara debe ver como mínimo 3 marcas. Las dimensiones de esta celda están limitadas por el ángulo de visión de la cámara y la altura entre la cámara y las marcas.

En el caso de querer situar marcas a más o menos distancia, habría que realizar el cálculo para determinar la proyección del ángulo de visión de la cámara (determinado en el apartado 3.4.6) a esa distancia. Esto se puede ver en la Figura 33 donde se representa la proyección del ángulo de la cámara a una altura 'z'.

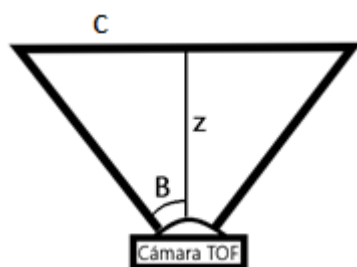


Figura 33: Proyección del ángulo de la cámara a una altura 'z'

$$\widehat{\text{Angulo de visión}} = 28,95^\circ = \hat{B}$$

$$\tan(\hat{B}) = \frac{c}{z}$$

$$c = z * \tan(28,95^\circ)$$

En nuestro caso hemos utilizado una altura entre cámara y marcas de 340 cm, dando lugar a la proyección de un cuadrado de 376,15 cm de lado, es decir, que la cámara ve un cuadrado de 376,15 cm a una altura de 340 cm en la que ella es el centro.

A continuación, se explica un caso genérico donde la cámara ve 3 marcas, y posteriormente se entrará en detalle sobre la definición de una celda de posicionamiento.

4.1. Caso general de trilateración

Como se ha explicado, el objetivo de este TFG no es realizar un sistema de posicionamiento completo, sino evaluar el sensor como elemento válido para ello. Por tanto, en esta sección no se implementa un método de localización, en el cual habría que obtener una estimación de la posición mediante alguno de los métodos típicamente conocidos (por ejemplo, una estimación mediante mínimos cuadrados no lineales, resuelta numéricamente mediante un algoritmo de Newton-Gauss). En esta sección se ilustra de forma gráfica (geoméricamente) su utilidad como sensor de posicionamiento con las distancias observadas a partir del fichero PCD.

Un caso general es cuando la cámara ve un mínimo de 3 marcas, aunque en un sistema real habría casos donde el número de marcas que la cámara ve podría ser mayor, esto dependerá de la celda de posicionamiento que en el apartado 4.2 se explica.

En la Figura 34 vemos la solución gráfica en 2D del problema de posicionamiento. Las marcas son puntos de referencia cuya posición es conocida, con ellas y la distancia a la cámara, podremos generar las esferas cuyo radio es la distancia obtenida y cuyo centro es la marca.

Para la resolución del sistema de ecuaciones que se plantea en este método necesitamos 3 marcas (3 esferas) y un plano, este plano será horizontal y se corresponde con la altura a la que está la cámara del suelo, la cual es conocida y constante. Este plano se puede utilizar para descartar posibles soluciones que puede tener el sistema de ecuaciones que generan las 3 esferas.

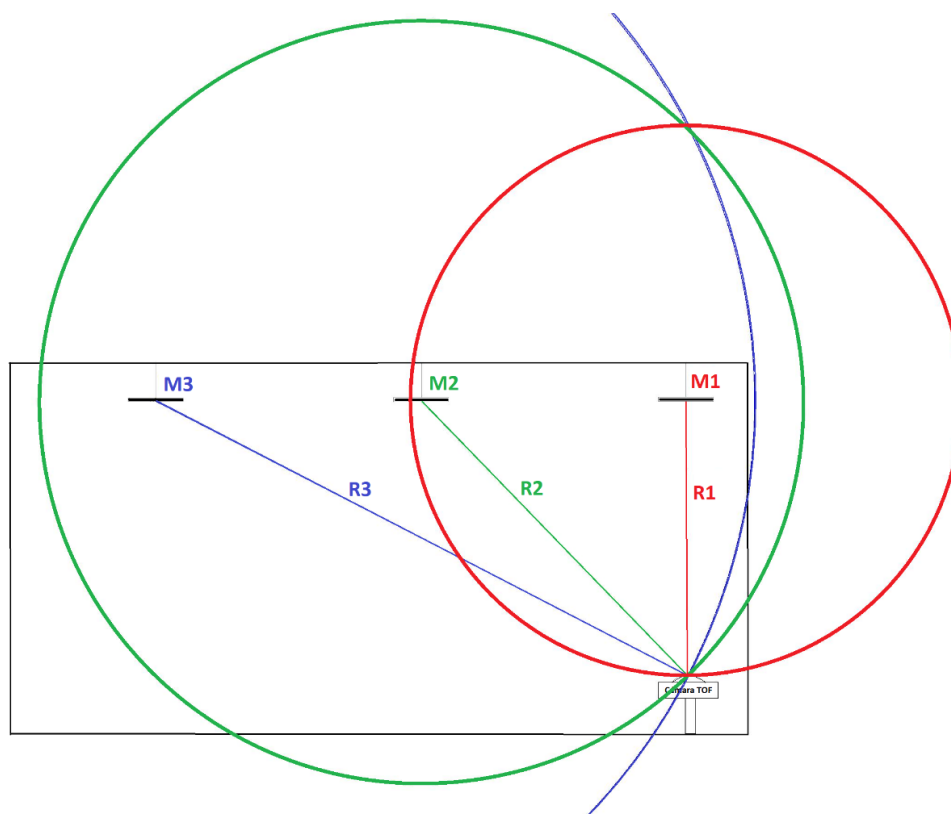


Figura 34: Espacio de posicionamiento y trilateración mediante 3 marcas pasivas

En la Figura 34 podemos ver que la solución al sistema de ecuaciones es una solución doble, es decir que los puntos de corte de las 3 circunferencias tienen dos posibles ubicaciones. Esto en realidad no es así, si no que hay que visualizar dichas circunferencias como esferas. El lugar geométrico que se genera como intersección de 2 cortezas de esfera (superficie exterior) es una circunferencia, la cual al cortarse con una tercera corteza tendrá 2 posibles soluciones (2 puntos). Pero es posible saber cuál de las 2 soluciones es la correcta, si hacemos la intersección con el plano horizontal en el que se encuentra la cámara o simplemente descartar la solución que queda fuera del espacio de posicionamiento.

Aplicación a trilateración

Hemos realizado una prueba situando las marcas a una altura de 340 cm respecto a la cámara. Estas marcas están situadas de la siguiente forma: La marca 1 (**M1**) está a 340 cm de altura en rayo directo con la cámara, y la marca 2 (**M2**) está a la misma altura, pero separada 100 cm de **M1**, y **M3** está a 100 cm de **M2** y a 200 cm de **M1**. Con estas posiciones se han obtenido 10 ficheros PCD, con el fin de obtener las distancias entre la cámara y cada marca. Los resultados obtenidos se pueden ver en la Tabla 12, cuyas medidas están en centímetros.

Medidas de 10 ficheros PCD de marca 1				Medidas de 10 ficheros PCD de marca 2				Medidas de 10 ficheros PCD de marca 3			
Mmedida sensor	Medida real	Error	desviación	Mmedida sensor	Medida real	Error	desviación	Mmedida sensor	Medida real	Error	desviación
340.55	340.00	0.55	4.57	355.88	354.40	1.48	7.90	392.09	394.46	2.37	14.07
341.87	340.00	1.87	4.56	355.60	354.40	1.20	7.36	395.13	394.46	0.67	10.18
341.31	340.00	1.31	4.62	355.09	354.40	0.69	7.58	379.86	394.46	14.60	69.68
338.82	340.00	1.18	4.44	355.25	354.40	0.85	7.45	395.18	394.46	0.71	9.88
341.19	340.00	1.19	3.71	358.19	354.40	3.79	8.38	406.37	394.46	11.91	68.47
340.81	340.00	0.81	5.12	359.78	354.40	5.38	9.15	389.25	394.46	5.21	8.09
340.44	340.00	0.44	5.33	357.57	354.40	3.17	7.44	405.32	394.46	10.85	68.02
342.24	340.00	2.24	4.72	357.27	354.40	2.87	8.12	400.00	394.46	5.53	9.03
340.51	340.00	0.51	4.03	355.49	354.40	1.09	6.01	430.37	394.46	35.90	113.85
341.23	340.00	1.23	3.56	360.34	354.40	5.94	7.56	404.18	394.46	9.72	142.74
MEDIA				MEDIA				MEDIA			
340.90	340.00			357.05	354.40			399.77	394.46		
Error medida final		1.13	4.46	Error medida final		2.64	7.70	Error medida final		9.75	51.40
-0.90				-2.64				-5.31			

Tabla 12: Medidas a 3 marcas para realizar el método de trilateración

Obtener valores elevados de desviación típica en el análisis de un fichero PCD indica que esa medida no es muy fiable. En la Tabla 12 mostramos en colores rojo, verde y azul, la información que proporciona la cámara respecto a cada marca.

En las medidas de la marca 3 (color azul) destaca el alto valor que toma la desviación típica, esto se debe a que la marca 3 es la que tiene un mayor ángulo respecto la cámara y lo que sucede es que en ciertas medidas (mostradas en rojo clarito) la desviación típica se eleva.

La explicación a esto es que alguno de los 25 píxeles de la ventana de medida, es un píxel erróneo, es decir, un mismo píxel puede entregar una medida de distancia próxima a la media, o en instantes puntuales de tiempo los píxeles pueden ser lo que llamamos “píxeles voladores” (píxeles que entregan una medida errónea y se generan aleatoriamente, aunque con más frecuencia en las discontinuidades de los objetos) y entregar una medida muy distinta a la media haciendo que aumente el error. Para comprender mejor este suceso, se realizan capturas de la imagen de fase en diferentes instantes de tiempo con el fin de visualizar estos píxeles voladores.

En la Figura 35 podemos ver 4 imágenes de fase de las 3 marcas en diferentes instantes. Se ha hecho un círculo en la primera imagen alrededor de cada marca para indicar su posición. En la imagen se aprecia que las marcas 1 y 2 (círculos rojo y verde) no tienen píxeles voladores en su interior, sin embargo, en la marca 3 vemos gran variación de una imagen respecto a otra. Por ejemplo, en la primera imagen encontramos un par de píxeles de color rojo justo en el centro de la marca (la cual debería ser entera de color verde), esto dará lugar a imprecisiones en la medida, las cuales son detectables en el alto valor que toma la desviación típica.

Por ello, las muestras con un alto valor desviación típica serán consideradas como outlier, descartando así estas medidas. En la Tabla 13 podemos ver el resultado de eliminar las medidas de la marca 3 que obtuvieron una alta desviación típica. Con este criterio de selección de medidas, el cual debería tenerse en cuenta en la futura aplicación real, se ha pasado de tener un error en la medida de 5,31 cm a 13 milímetros.

Eliminación de medidas con alta desviación típica

Mdedida sensor	Medida real	Error	desviación
392.09	394.46	2.37	14.07
395.13	394.46	0.67	10.18
395.18	394.46	0.71	9.88
389.25	394.46	5.21	8.09
400.00	394.46	5.53	9.03
MEDIA			
394.33	394.46	2.90	10.25
Error medida final			
0.13			

Tabla 13: Eliminación de medidas con alta desviación típica

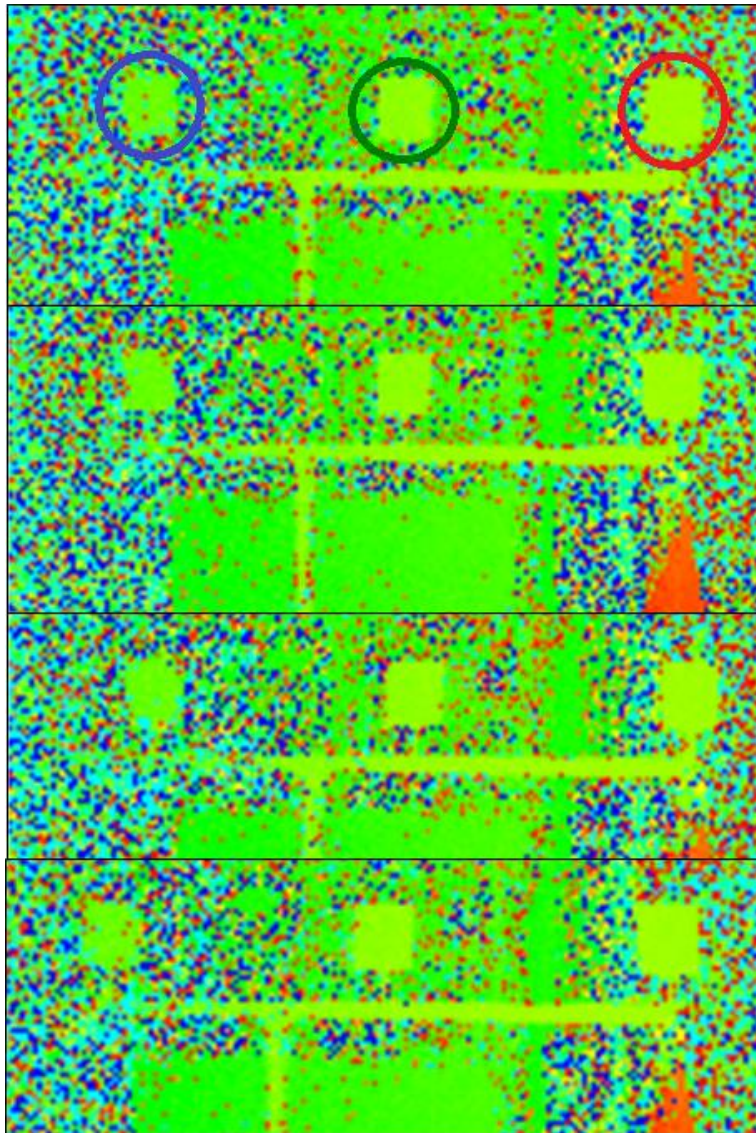


Figura 35: Imagen de fase de las 3 marcas en diferentes instantes

4.2. Celda de posicionamiento

En el caso general de trilateración es suficiente con tener 3 marcas, pero en un sistema real suele disponerse de un número mayor si esto es posible, con el fin de evitar oclusiones o mejorar la precisión. Por ejemplo en GPS se tiene una constelación formada por 24 satélites, esto permite tener posicionado cualquier receptor en todo el globo terrestre sin tener zonas de sombra. Además también permite obtener mejores precisiones en la medida, ya que una medida será más precisa cuando más satélites se use para obtener la posición.

En este apartado se define la unidad mínima del espacio de posicionamiento que se puede cubrir con 3 marcas, que son el número mínimo para poder obtener la posición.

En un escenario real habría que hacer un estudio de cómo colocar las marcas y el número de marcas necesarias para cubrir todo el espacio de localización. En este apartado se especifica la celda mínima de posicionamiento, la cual se podrá usar en repetidas ocasiones para generar el espacio de posicionamiento deseado. Existen muchas posibilidades sobre la forma en la que se pueden colocar las marcas para cubrir el espacio, pero todas ellas tendrán en común el siguiente principio de funcionamiento el cual caracteriza a la celda mínima de posicionamiento: La cámara siempre deberá ver 3 marcas suponiendo la peor de las posiciones, es decir, en casos extremos.

Esta celda depende del mínimo ángulo de visión que tiene la cámara y de la altura entre la cámara y las marcas, la cual determina la proyección de ese ángulo. Siendo 'z' la altura entre los planos horizontales en los que se sitúan la cámara y las marcas, se obtiene la distancia a la que ve la cámara para el ángulo más crítico.

$$c = z * \tan(28,95^\circ)$$

El ángulo de visión más restrictivo de la cámara es el vertical. En la Figura 36 podemos ver en color negro la imagen que ve la cámara, y en color rojo se ve la imagen que ve la cámara con el ángulo vertical de $28,95^\circ$ si rotamos la cámara 360° sobre su eje, considerando su eje el centro del rectángulo de visión.

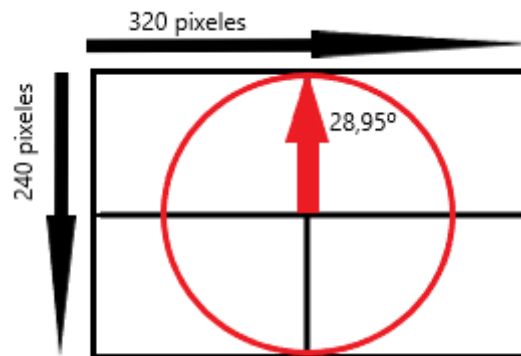


Figura 36: Ángulo de visión de la cámara

En esta aplicación en la que la cámara apunta al techo y es el punto móvil a posicionar, esta puede situarse en cualquier punto del espacio de posicionamiento y en el punto en el que se encuentre puede estar rotada sobre su eje en cualquier ángulo, por ello debemos limitar siempre el rango de visión a la circunferencia que se forma con ese ángulo para ponernos en la situación más crítica.

En la Figura 37 observamos la celda de posicionamiento que se genera con 3 marcas. El diámetro de esa circunferencia es la distancia 'c' cuya fórmula ha sido descrita anteriormente. La distancia 'c' es la más restrictiva que tiene la cámara en cuanto a la proyección del ángulo de visión. Por lo que la cámara se puede situar en cualquier punto dentro de ese círculo, de tal forma que siempre verá las 3 marcas.

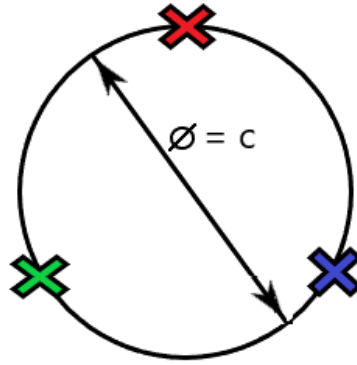


Figura 37: Celda de posicionamiento

En la Figura 38 vemos un caso extremo, dónde la cámara se encuentra justo en el borde de la celda de posicionamiento. La cámara es la estrella de color amarillo cuyo ángulo crítico de visión es una circunferencia de radio 'c' (circunferencia de color amarillo).

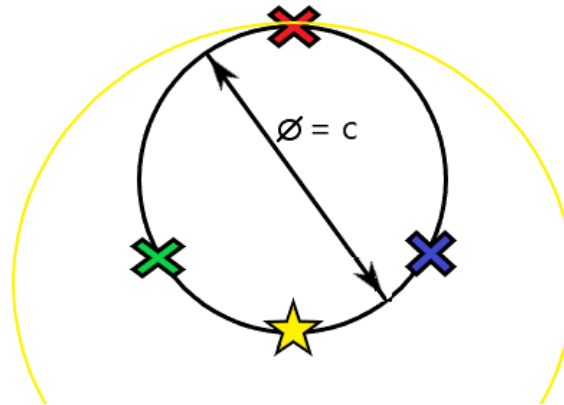


Figura 38: Posición extrema de la cámara

A la hora de ampliar la zona de localización, para un espacio que requiera de muchas celdas, en el caso de tenerlas en los extremos de la circunferencia de diámetro 'c' pueden ser utilizadas para construir otras celdas (añadiendo únicamente una marca más). En la Figura 39 se ha aumentado el espacio añadiendo solo una marca (cruz rosa) y aprovechando dos marcas ya instaladas en la celda inicial (marcas roja y verde).

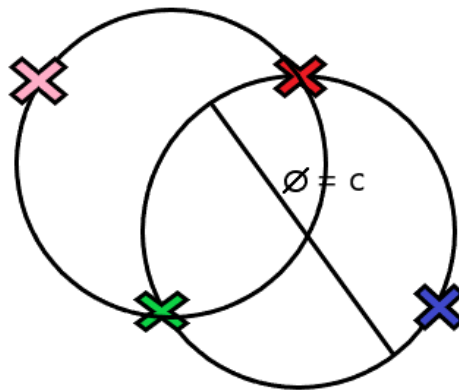


Figura 39: Ampliación del espacio añadiendo una marca

Aplicación a trilateración

La otra posibilidad para aumentar el tamaño de una celda es juntar las marcas en un círculo concéntrico con un diámetro menor que el de la circunferencia inicial 'c'. En la Figura 40 se han desplazado las marcas una distancia 'x' respecto de la posición inicial que se tenía en la Figura 37. La misma distancia 'x' es la que ha aumentado la celda de posicionamiento, siendo el círculo negro exterior de un diámetro 'c + x'.

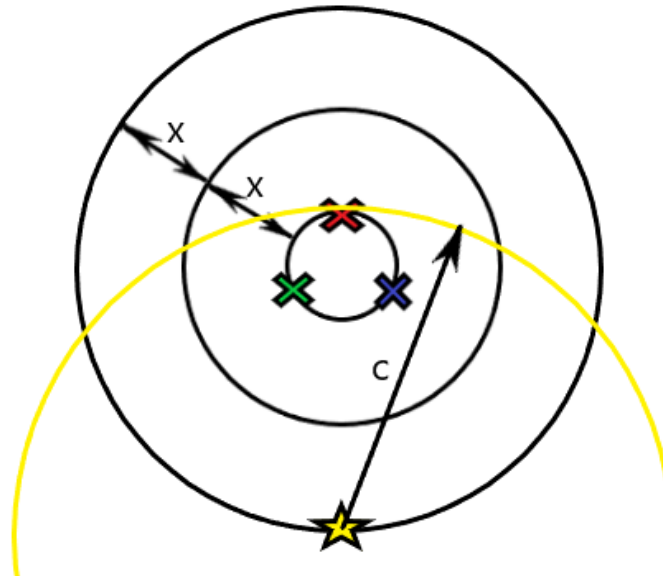


Figura 40:Ampliación de la celda juntando las marcas

Esta técnica puede ser útil en ciertos espacios determinados, pero en este caso para añadir nuevas celdas habría que hacerlo insertando 3 nuevas marcas. Otro aspecto a tener en cuenta es que las marcas no deben estar muy próximas ya que los puntos de corte de las esferas que generan serían menos abruptos y con lo cual más imprecisos.

En este capítulo se pretende únicamente plantear algunas posibilidades que presentarían las marcas en un futuro sistema de localización. Todas ellas deberán cumplir lo siguiente: La cámara podrá situarse en cualquier punto del espacio de localización de tal forma que en cualquier punto siempre tenga como mínimo 3 marcas en la circunferencia de visión de la cámara, es decir, circunferencia amarilla de radio 'c'.

Estas posibilidades dependen también del espacio de localización concreto, de tal forma que, una solución que se considera buena para un determinado espacio, podría no serlo para otro. Cada espacio de localización deberá llevar un estudio previo de cuál es la mejor manera de situar las marcas en él.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es que la aplicación real debe diferenciar unas marcas de otras, por lo que no solo es necesario un algoritmo para detectar una marca y obtener la distancia a ella, sino que necesitamos un mecanismo de diferenciación de marcas.

Esto implica que en un espacio de localización relativamente grande necesite una solución lo más eficiente posible, es decir, con el menor número de marcas para cubrir todo el espacio sin tener zonas de sombra.

En el próximo capítulo sobre líneas futuras se trata el tema de la detección y la diferenciación de marcas, ya que sería el próximo paso a resolver para en un futuro llegar a la aplicación en tiempo real que se encargará de detectar, diferenciar y obtener la distancia a cada marca que tenga en su campo de visión, y con esa información realizar el procedimiento de trilateración esférica para obtener la posición.

5. Conclusiones y líneas futuras

En este capítulo se explican las conclusiones que se obtienen del desarrollo de este proyecto, el cual propone utilizar la cámara de tiempo de vuelo OPT8241 para su uso en posicionamiento en espacios interiores. Por ello en este trabajo se ha realizado la validación de este sensor y la definición teórica del sistema de posicionamiento. Es decir, que el proyecto realizado es la primera fase de un proyecto mayor, dando lugar a un apartado de líneas futuras con fuerte contenido.

5.1. Conclusiones

En primer lugar, se han adquirido los conocimientos teóricos necesarios para comprender el principio de funcionamiento que rige a una cámara de tiempo de vuelo, la cual genera una imagen en 3D a partir de la distancia que tiene almacenada en cada pixel. Por otro lado, hemos realizado una extrapolación del funcionamiento ideal del GPS a el sistema de posicionamiento en interiores que se pretende desarrollar. Este sistema consiste en tener unas marcas pasivas fijas como puntos de referencia conocidos, de tal forma que la cámara detectará dichas marcas en la información 3D y obtendrá la distancia a cada una de ellas para realizar el método de trilateración y obtener la posición de la cámara.

Es importante tener claro cómo va a funcionar el sistema final, ya que, aunque no se desarrolle en este proyecto, las pruebas realizadas se orientan a un espacio de trabajo concreto, es decir, que las pruebas fundamentales para validar este sensor se realizan simulando un escenario real como el descrito en el apartado 3.4.2.

A lo largo de las pruebas de medida de distancia se hace referencia a los errores que puede haber en la información que proporcionan algunos pixeles, de tal forma que en instantes puntuales se pueden tener errores, tanto por la variación en el tiempo de la información como por los llamados “pixeles voladores” (pixeles que entregan una medida errónea y se generan aleatoriamente, aunque con más frecuencia en las discontinuidades de los objetos). Este proyecto da solución a esos 2 problemas:

- Diseño de un programa en Matlab que toma la medida de distancia automáticamente del fichero PCD (Point Cloud Data) que proporciona la cámara. En ese programa, la obtención de las medidas de distancia se realiza mediante una ventana de 5 x 5 pixeles (horizontal por vertical), haciendo que la medida de distancia proporcionada sea una media de estas 25 muestras. Esto hace que se compensen los pequeños errores de la variación de la medida de distancia que dan los pixeles en función del tiempo.
- Con la solución anterior no se resuelven los grandes errores que introducen los “pixeles voladores” ya que la medida que da este pixel se desvía mucho de la media. Para dar solución a este problema realizamos el cálculo de la desviación típica de las 25 muestras. En caso de tomar un valor elevado, consideraremos esa medida como falsa y no se tiene en cuenta.

En este proyecto se realizan las medidas siguiendo los 2 puntos anteriores, es aconsejable obtener varias medidas de diferentes ficheros PCD. De tal forma que obtendremos la distancia como media de 10 ficheros PCD de los cuales el programa de Matlab toma 25 muestras, por lo que la media es el resultado de 250 muestras, siendo este un número aceptable que otorga confianza a los resultados.

Las pruebas realizadas dan lugar a que el OPT8241 tenga una precisión de 8 milímetros de media en todo su rango angular cuando el objeto a medir está a una distancia de entre 350 y 415 cm. Esta precisión tiene una desviación típica asociada de 6,8 cm.

Con estos datos consideramos a esta cámara de tiempo de vuelo como válida para ser el elemento que obtiene las medidas de distancia a las marcas en la aplicación de posicionamiento que se pretende desarrollar.

Los ángulos de visión de la cámara son otro aspecto importante, ya que estos tienen gran influencia en el sistema de posicionamiento. Es decir, que la cámara tiene que ver siempre un mínimo de 3 marcas para poder obtener su posición, esto da lugar a la definición de celda mínima de posicionamiento: En un espacio en el que se pueda posicionar la cámara, esta deberá tener siempre 3 marcas como mínimo dentro de su rango de visión sea cual sea la posición de la cámara dentro de ese espacio.

La forma en la que se posicionan las marcas es la que determina la celda de posicionamiento, ya que, dependiendo de la estrategia seguida para situar las marcas, se obtendrán diferentes variantes de celda de posicionamiento. Se habla sobre las posibilidades de cómo situarlas en el apartado 4.2.

El ángulo de visión de la cámara es siempre fijo, a no ser que se sustituya la lente del sensor. Suponiendo que las marcas se sitúen en un plano horizontal en el techo y la cámara apunte desde el suelo, la cámara visualiza siempre la misma región del plano a esa altura.

Por ello definimos la región mínima que se genera a esa altura con el ángulo más restrictivo de la cámara (ángulo vertical de $28,95^\circ$). Esta región es una circunferencia de radio 'c', siendo 'z' la altura entre la cámara y el plano donde se sitúan las marcas (explicación más detallada en apartado 4). Es decir, se obtiene la región que en todo momento ve la cámara a una determinada altura.

A la hora de diseñar un sistema real sería necesario conocer el espacio de localización concreto y hacer un estudio detallado de cómo situar las marcas en él.

A continuación, se explican las diferentes fases que quedan pendientes de realizarse como trabajos futuros para llegar al sistema de posicionamiento en interiores que este proyecto plantea.

5.2. Líneas futuras

En este apartado se definen una serie de fases para la continuación de este proyecto, estas ideas, no deben entenderse como pasos fijos a seguir, ya que la continuación de este trabajo está muy abierta en cuanto a tareas que realizar.

Las fases restantes se pueden dividir en 2 proyectos diferentes, por un lado, está la necesidad de un algoritmo que detecte y diferencie marcas unas de otras en tiempo real, y por otro lado se necesita un algoritmo que realice el posicionamiento de la cámara a partir de las medidas obtenidas a las marcas.

5.2.1. Detección y diferenciación de marcas

Este proyecto tendrá que trabajar sobre el fichero PCD que el OPT8241 proporciona. Este fichero se ha utilizado como fuente de datos en Matlab para la obtención de medidas de distancia, por lo que el programa desarrollado en este proyecto puede servir de base para la iniciación en este otro.

Debemos diferenciar entre detectar una marca y diferenciarla de otra, esto son cosas muy distintas, es decir, si tendremos un algoritmo que nos detecta un tipo de marca concreta, se estaría desaprovechando el código realizado si tenemos que realizar un código particular para detectar cada marca. Por ello, algo eficiente sería tener un único diseño de marca, de tal forma que todas las marcas se detecten por el mismo algoritmo. En este caso hemos simplificado el problema de la detección, pero no se está haciendo diferenciación de marcas, por ello habría que tener alguna forma de identificarlas. Aquí las soluciones pueden ser muy diversas, por ejemplo, podríamos diseñar marcas de tal forma que tuvieran una parte común para la detección y otra parte distinta para la diferenciación.

Esto también depende del tamaño del espacio de localización, por ejemplo, para un espacio relativamente pequeño se podría realizar la diferenciación de marcas directamente codificada en la posición de estas dentro del espacio de posicionamiento. Si en lugar de situar las marcas en el mismo plano horizontal cercano al techo, las situamos a diferentes alturas de tal forma que se conozca la altura que tiene cada marca respecto de la cámara, sin que haya en el espacio de posicionamiento otros elementos a las mismas alturas que tiene cada marca.

Esta forma de situar las marcas permitiría hacer una rápida detección y diferenciación, ya que con la información de eje Z se podían detectar marcas directamente, porque el eje Z coincide con la altura de cada marca. Por ello este algoritmo tendría que buscar solamente en el eje Z los datos que coincidan con dichas alturas, de tal forma que al tener cada marca a una altura diferente sabríamos también a que marca pertenece.

Esta solución tiene sus limitaciones ya que no se puede hacer una codificación de muchas marcas, y además complica el diseño de la celda de posicionamiento al tener marcas en diferentes alturas.

Las posibilidades están muy abiertas, pero si algo hay que tener en cuenta es, la ventaja de usar una cámara de tiempo de vuelo es que el procesamiento de los datos del fichero PCD se hace muy rápido en comparación con los algoritmos tradicionales (procesamiento de imágenes) de visión artificial en 2D. Por ello, no tendría sentido una solución que detecte marcas en una imagen en 2D, es decir, el problema planteado se debería abordar mediante formas o marcas en 3 dimensiones para que sean detectadas en el fichero PCD directamente.

Por último, este proyecto debería implementar dichos algoritmos en un programa que se ejecute en tiempo real y que sea autónomo a la hora de tratar con la cámara.

5.2.2. Algoritmo de posicionamiento

El punto de partida de este proyecto ya cuenta con un sistema que trabaja en tiempo real y es capaz de proporcionar las distancias a las que se encuentran las marcas que la cámara está viendo.

Este proyecto tratará de diseñar el algoritmo de posicionamiento realizando el método de trilateración con las distancias obtenidas. Deberá tener en cuenta diferentes espacios de localización de tal forma que consiga desarrollar una propuesta de cómo situar las marcas en cualquier espacio. Esta fase, aunque se resume muy rápido es una tarea muy complicada porque al ser un sistema real deberá lidiar con todos los posibles errores que tendrá este, de tal forma que tendrá que ideárselas para reducir los errores del sistema y entregar la posición de la cámara de la manera más precisa.

En este proyecto también se podría realizar una pequeña aplicación, por ejemplo, el montaje sobre algún objeto móvil, como un coche teledirigido, de tal forma que podamos obtener la traza que deja este con su movimiento dentro del espacio de localización.

5.2.3. Escalabilidad

A partir de ese punto (proyectos anteriores resueltos) se podrán generar nuevos trabajos de tal forma que se dé escalabilidad al sistema, es decir, introducir diferentes cámaras de tiempo de vuelo dentro de un mismo espacio de posicionamiento, para posicionar diferentes móviles en ese espacio. Esto probablemente dé lugar a problemas graves ya que las ondas infrarrojas emitidas de una cámara pueden introducirse por la lente de las demás, afectando a las medidas. Habría que investigar para dar solución a ese posible problema mediante algún algoritmo de sincronización de cámaras.

Este problema podría tener su solución en la investigación del Hardware de esta cámara de tiempo de vuelo que está desarmada, es decir, que conociendo las señales del Hardware se podría hacer uso de ellas, tanto para obtener información como para modificar dichas señales.

Bibliografía

- [1] "SENSORES PARA PERCEPCIÓN 3D EN ROBÓTICA – Blog de robótica y programación", *Blog.pucp.edu.pe*, 2018. [Online]. Available: <http://blog.pucp.edu.pe/blog/robotica/2018/01/18/sensores-para-percepcion-3d-en-robotica/>. [Accessed: 27- Dec- 2018].
- [2] Texas Instrument, "Introduction to Time-of-Flight Camera", 2014. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/wp/sloa190b/sloa190b.pdf>. [Accessed: 27- Dec- 2018].
- [3] M. Hansard, S. Lee, O. Choi and R. Horaud, *Time-of-flight cameras: principles, methods and applications*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [4] Texas Instrument, "Introduction to the Time-of-Flight (ToF) System Design", 2013. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ug/sbau219d/sbau219d.pdf>. [Accessed: 27- Dec- 2018].
- [5] D. Jiménez-Cabello, *Correction of errors in time of flight cameras, Tesis Doctoral*. Universidad de Alcalá de Henares, 2015.
- [6] "Voxel Viewer User's Guide", 2015. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ug/sbou157/sbou157.pdf>. [Accessed: 27- Dec- 2018].
- [7] Texas Instrument, "OPT8241 CDK Evaluation Module Quick Start Guide", 2015. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ug/sbou156b/sbou156b.pdf>. [Accessed: 27- Dec- 2018].
- [8] Texas Instrument, "OPT8241 Evaluation Module User's Guide", 2015. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ug/sbou155b/sbou155b.pdf>. [Accessed: 27- Dec- 2018].
- [9] Texas Instrument, "OPT8241 3D Time-of-Flight Sensor datasheet", 2015. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opt8241.pdf>. [Accessed: 27- Dec- 2018].
- [10] "Documentation - Point Cloud Library (PCL)", *Pointclouds.org*, 2018. [Online]. Available: http://pointclouds.org/documentation/tutorials/pcd_file_format.php/pcd-file-format. [Accessed: 27- Dec- 2018].
- [11] R. García Jiménez, *Detección y conteo de personas, a partir de mapas de profundidad cenitales capturados con cámaras TOF*. 2015.
- [12] M. Higuera Pinillos, *Desarrollo de una interfaz común para la configuración y adquisición de datos de cámaras de tiempo de vuelo*. 2018.
- [13] D. Fuentes Jiménez, *Diseño, implementación y evaluación de un sistema de conteo de personas basado en cámaras de tiempo de vuelo*. 2016.
- [14] D. Montagud Cortés, *Estudio de cámaras de tiempo de vuelo (ToF) para aplicaciones en exteriores*. 2018.
- [15] "¿Cómo funcionan los dispositivos GPS? Trilateración vs Triangulación | El blog de franz", *El blog de franz*, 2018. [Online]. Available: <https://acolita.com/como-funcionan-los-dispositivos-gps-trilateracion-vs-triangulacion/>. [Accessed: 28- Dec- 2018].
- [16] "OPT8241-CDK-EVM 3D ToF Sensor Evaluation Module - Texas Instruments | Mouser España", Mouser.es, 2018. [Online]. Available: <https://www.mouser.es/new/Texas-Instruments/ti-opt8241-cdk-evm-evaluation-module/>. [Accessed: 29- Dec- 2018].

- [17] B. AG, "Basler Time-of-Flight Camera | Basler", Basler AG, 2018. [Online]. Available: <https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/3d-cameras/time-of-flight-camera/>. [Accessed: 29- Dec- 2018].

Anexo: Código Matlab

```

function varargout = dist_PCD(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',   @dist_PCD_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',    @dist_PCD_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',    [] , ...
                  'gui_Callback',     []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function dist_PCD_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);

function varargout = dist_PCD_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;

function entrada2_Callback(hObject, eventdata, handles)

function entrada2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function entrada1_Callback(hObject, eventdata, handles)

function entrada1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function entrada3_Callback(hObject, eventdata, handles)

function entrada3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function entrada4_Callback(hObject, eventdata, handles)

function entrada4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function dist_Callback(hObject, eventdata, handles)

function dist_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

pixel_X=str2double(get(handles.entrada1,'String'));
pixel_Y=str2double(get(handles.entrada2,'String'));
real=str2double(get(handles.dist,'String'));
ejec=pwd;
[file,path] = uigetfile('*.pcd');
if isequal(file,0)
    disp('User selected Cancel');
else
    disp(['User selected ', fullfile(path,file)]);
end

cd(path);
ptCloud = pcread(file);

%Definición de variables a usar
distancia=0;
persistent error_acumulado;
persistent medida;
persistent reales;
persistent n;
persistent aux;
persistent aux2;
persistent inicio;
persistent Nombre;
persistent ruta;

medida();
reales();
aux();
aux2();

%n es un contador utilizado para las inicializaciones
if(n<20)
    n=n+1;
else
    n=1;
    inicio=1;
end

if(n==1)
    error_acumulado=0;
end

%Ventana de 5x5 pixeles: Al pixel (x, y) se le suma y
%resta 2 para crear los límites de la ventana
mayor_i=pixel_Y+2;
menor_i=pixel_Y-2;
mayor_j=pixel_X+2;
menor_j=pixel_X-2;

%Índices del bucle para obtener la distancia a cada pixel de la ventana
ind_i=menor_i:mayor_i;
ind_j=menor_j:mayor_j;

```



```

for i=1:length(ind_i)%Bucle del eje vertical
    for j=1:length(ind_j)%Bucle del eje horizontal
        %Formula que obtiene la línea del fichero PCD en la que está cada pixel
        coordenadas=(320*ind_i(i)+ind_j(j));
        %Obtenemos las medidas de los ejes (X,Y,Z) de cada pixel
        pixelx= ptCloud.Location(coordenadas,1);
        pixely= ptCloud.Location(coordenadas,2);
        pixelz= ptCloud.Location(coordenadas,3);
        %Realizamos el módulo para obtener la distancia
        potencias = pixelx*pixelx+pixely*pixely+pixelz*pixelz;
        %Almacenamos la distancia en una matriz del tamaño de la ventana (5x5)
        distancia(i,j)=sqrt(potencias);
    end
end

%Obtenemos la distancia (en cm) como la media de las 25 medidas que tiene la
matriz
dist_media=100*mean(mean(distancia));

%Calculamos la desviación típica (en cm) entre esas 25 medidas
des=100*std(distancia(:));

%Calculamos el error medio (en cm y en valor absoluto) de todas las medias que se
realicen
error_acumulado=error_acumulado+abs(real-dist_media);

%Guardamos los datos obtenidos de las 25 muestras de la ventana
aux(n)=abs(real-dist_media);
aux2(n)=des;
medida(n)=dist_media;
reales(n)=real;

%Mostramos resultados por pantalla
set(handles.medida,'String',dist_media);
set(handles.error_medio,'String',error_acumulado/n);
set(handles.error_medida,'String',abs(real-dist_media));
set(handles.desviacion,'String',abs(des));

%Representación gráfica
hold on
stem(medida,'diamondr')
hold on
stem(reales,'b','filled');
grid on
legend('Medida Sensor','Medida Real')

fig=figure;
hold on
stem(medida,'diamondr')
hold on
stem(reales,'b','filled');
grid on
legend('Medida Sensor','Medida Real')
xlabel('medidas');
ylabel('cm');

saveas(fig,'imagen.fig')%Guardado automático de la figura
close.figure(1);

%Conversión de vector fila a vector columna
medida_transpuesta=medida';
reales_transpuesta=reales';
error=aux';
desv=aux2';

```

```

%Almacenamiento de datos en un fichero Excel
cab=["Medida sensor","Medida real","Error","desviacion"];
if(inicio==1)
    [Nombre, ruta] = uiputfile ({'*.xlsx'}, 'Guardar como');
    inicio=0;
end
xlswrite(fullfile(ruta, Nombre), cab);
matriz=[medida_transpuesta, reales_transpuesta, error, desv];
xlswrite(fullfile(ruta, Nombre), matriz, 'Hojal', 'A2');
cd(ejec);

handles.n=n;
guidata(hObject, handles);
function figure1_CloseRequestFcn(hObject, eventdata, handles)
opc=questdlg('Desea salir del programa?', 'SALIR', 'Si', 'No', 'No');
if strcmp(opc, 'No')
    return;
end
handles.n=1; %Inicializamos la variable n a 1
guidata(hObject, handles);
delete(hObject);

function uipushtool1_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)

```


Universidad de Alcalá Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá